Д. А. БАБЕНКО, С. И. ТЕПЛЕНКО
и Л. Д. ЧИБИШЕВ

В ПОМОЩЬ ЭЛЕКТРИКУ-ОБМОТЧИКУ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

В книге рассматриваются принципы получения трехфазного переменного тока и работы асинхронного электродвигателя, освещаются основные правила конструирования обмоток, даны схемы обмоток наиболее распространенных электродвигателей и примеры их составления.

Дана технология выполнения обмоток, изложен опыт Винницкого электротехнического завода по выполнению обмоток статора без паек схемы, указаны режимы пропитки и сушки статоров и роторов электродвигателей.

В доступной форме изложен сокращенный расчет обмоток электродвигателей и приведены примеры расчетов.

Книга предназначена для рабочих-обмотчиков и электриков, работающих в области ремонта электрических машин.

Книга может быть также полезна студентам энергетических техникумов при увязке ими теории обмоток с практикой их выполнения.

6П2.12 *Бабенко Демьян Алексеевич, Тепленко Сарра Исаковна*
Б 12 и *Чибишев Леонид Дмитриевич*

В помощь электрику-обмотчику трехфазных асинхронных электродвигателей, М.—Л., Госэнергоиздат, 1962, 176 с. с черт.

6П2.12

Редактор *Л. Г. Рубо* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 28/III 1962 г. Подписано к печати 16/VI 1962 г.
Т-08531 Бумага 84×108 1/32 9,02 печ. л. Уч.-изд. л. 9,8
Тираж 25 000 экз. Цена 49 коп. Зак. 2188

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический прогресс, механизация и автоматизация производственных процессов неразрывно связаны с ростом электровооруженности промышленности, транспорта и сельского хозяйства.

Для удовлетворения растущих нужд народного хозяйства планом развития народного хозяйства СССР предусмотрено к концу семилетки довести выработку электроэнергии до 500—520 млрд *квт·ч*, что потребует резкого увеличения установленной мощности электростанций, а также производства электрических двигателей.

Высокая оснащенность промышленных предприятий, совхозов и колхозов электрооборудованием потребует от обслуживающего персонала — электриков умения не только правильно эксплуатировать электрические машины, но и грамотно их ремонтировать.

Одним из наиболее часто встречающихся видов ремонта является частичная или полная замена обмотки статоров (иногда роторов) асинхронных электродвигателей, что может выполнить электрик, изучивший основы конструирования и технологию производства обмоточных работ.

Оказать помощь начинающим электрикам-расчетчикам и электрикам-обмотчикам, а также обмотчикам, имеющим определенный опыт и стремление к повышению своей квалификации, — такова цель предлагаемой книги.

Замечания, отзывы и пожелания по данной книге просим направлять по адресу: г. Москва, Ж-114, Шлюзовая наб. 10, Госэнергоиздат.

Авторы выражают глубокую благодарность Л. Г. Рубо за большую квалифицированную работу по редактированию книги, а также рецензенту Е. Л. Маршаку, давшему ценные указания по первоначальному тексту рукописи.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

1. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ПОНЯТИЕ О ТРЕХФАЗНОМ ТОКЕ. СДВИГ ФАЗ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ

Основными источниками электрической энергии являются:

электрические генераторы постоянного и переменного тока, преобразовывающие механическую энергию в электрическую;

гальванические элементы и аккумуляторные батареи, преобразовывающие химическую энергию в электрическую;

термоэлементы и термоэлектробатареи, преобразовывающие тепловую энергию в электрическую;

фотоэлементы (вентильные) и солнечные батареи, преобразовывающие световую (лучистую) энергию в электрическую.

Промышленное значение пока имеют первые два вида источников электрической энергии, позволяющие вырабатывать ее в больших количествах.

Непосредственное превращение тепла и света в электрическую энергию характеризуется низким к. п. д. и незначительной мощностью, поэтому получаемый таким образом электрический ток в основном используется для производства различных измерений, сигнализации, телемеханики и связи.

Переменным током называется такой электрический ток, который непрерывно меняет свою величину и на-

правление. Переменный ток практически применяется как однофазный и трехфазный.

Если проводник, обозначенный на рис. 1 кружочком, вращать по часовой стрелке в магнитном поле, созданном двумя полюсами магнита: *С* и *Ю*, то при пересечении им магнитных силовых линий в нем будет по закону электромагнитной индукции наводиться электродвижущая сила (э. д. с.).

Мгновенное значение индуктированной в проводнике э. д. с., *e* пропорционально магнитной индукции *B*, дли-

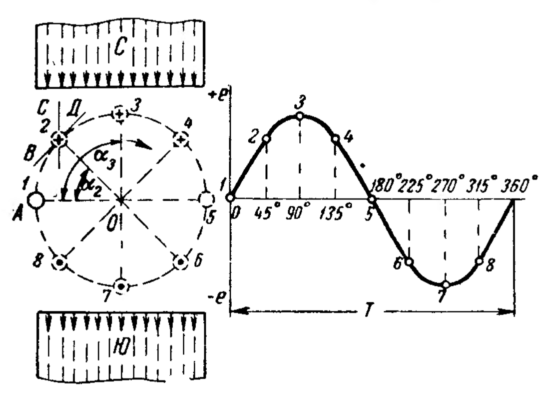


Рис. 1. Изменение э. д. с. в проводнике, вращающемся в магнитном поле.

не активной части проводника *l*, скорости вращения проводника *v* и синусу угла α, под которым проводник пересекает магнитные силовые линии, и выражается формулой

$$e = Blv \sin\alpha \cdot 10^{-8}\ в. \qquad (1)$$

Индукция *B* выражается в гауссах, длина *l* — в сантиметрах, скорость *v* — в сантиметрах в секунду.

Если проследить равномерное движение проводника по окружности в неизменяющемся равномерном магнитном поле (рис. 1), то, достигнув точки *1*, проводник двигается параллельно направлению магнитных силовых линий, не пересекая их, и поэтому наводимая в этой точке э. д. с. равна нулю, так как угол α_1 между линией, касательной к окружности в точке *1*, показывающей направление движения проводника в данное

мгновение времени, и линией, показывающей направление магнитных силовых линий, равен нулю, а синус угла, равного нулю градусов, равен нулю. Следовательно, $e_1=0$.

Для определения величины угла, под которым проводник пересекает магнитные силовые линии в точке *2* (угол *CBD*), следует предварительно вычислить величину угла α_2, образованного линией, соединяющей проводник с центром окружности, и радиусом *AO*. Так как окружность на рис. 1 разделена на восемь равных частей, угол α_2 будет равен $360:8=45°$. Но угол *CBD* и угол α_2 равны, как имеющие взаимно перпендикулярные стороны. Поэтому угол, под которым проводник пересекает магнитные силовые линии в точке *2*, равен 45°, а $\sin 45°=0{,}707$. Если предположить, что произведение $Blv\cdot 10^{-8}=20$, то э. д. с. в точке *2* будет равна:

$$e_2=Blv\cdot 10^{-8}\sin\alpha_2=20\cdot 0{,}707=14{,}14\ \textit{в}.$$

В точке *3* проводник пересекает магнитные силовые линии под углом 90°, т. е. движется перпендикулярно магнитным силовым линиям. В этом случае индуктированная э. д. с. будет иметь максимальную величину, так как синус угла, равного 90°, равен 1 и значение э. д. с. в точке *3* будет равно:

$$e_3=Blv\cdot 10^{-8}\sin\alpha_3=20\cdot 1=20\ \textit{в}.$$

Точка *4* по расположению на окружности соответствует точке *2*, почему и индуктированная э. д. с. будет равна:

$$e_4=20\cdot 0{,}707=14{,}14\ \textit{в}.$$

Точка *5* соответствует точке *1* и индуктированная э. д. с. $e_5=0$.

Таким образом, э. д. с., индуктированная в движущемся по окружности в магнитном поле проводнике, будет плавно изменяться от нуля до максимальной величины в первой четверти окружности и от максимальной величины до нуля во второй четверти окружности.

Направление индуктированной в проводнике э. д. с. определяется по правилу правой руки, которое гласит: «если ладонь правой руки расположить так, чтобы магнитные силовые линии, выходящие из северного полюса, входили в нее, а отогнутый большой палец указывал направление движения проводника, то остальные

четыре вытянутых пальца покажут направление индуктированной э. д. с.». На чертежах направление э. д. с. в проводнике от нас к плоскости чертежа принято обозначать крестиком, а от плоскости чертежа к нам — точкой. На рис. 1 направление э. д. с. в проводнике в первой и второй четвертях окружности будет иметь направление от нас к плоскости чертежа, что в точках *2*, *3* и *4* показано крестиками.

При движении проводника во второй половине окружности характер изменения индуктированной э. д. с. будет таким же, но направление ее изменится на обратное, т. е. э. д. с. будет направлена от плоскости чертежа к нам, что можно проверить, используя правило правой руки, где руку следует повернуть вытянутыми четырьмя пальцами к себе, чтобы большой палец показывал изменившееся направление движения проводника (от точки *5* к точке *1*).

Изменение направления э. д. с. при движении проводника во второй половине окружности вполне закономерно, так как проводник в первой половине окружности проходил под северным полюсом, а во второй половине он проходит под южным полюсом, пересекая магнитное поле в обратном направлении. На рис. 1 направление э. д. с. в точках *6*, *7* и *8* показано точками.

Если концы проводника соединить между собой непосредственно или через активную нагрузку, то при вращении в цепи появится электрический ток, направление которого в любой момент и в любом положении проводника будет совпадать с направлением индуктированной в нем э. д. с. и изменяться соответственно изменению э. д. с., т. е. за один оборот проводника по окружности их величины будут дважды изменяться от нуля до максимальной величины и снова до нуля. Характер изменения э. д. с. и тока будет соответствовать характеру изменения величины синуса угла α_1, под которым проводник, двигаясь по окружности, пересекает магнитные силовые линии.

Физическая сущность этого явления заключается в том, что проводник, двигаясь по окружности в равномерном магнитном поле, в каждое мгновение изменяет угол α, в связи с чем изменяется и число пересекаемых проводником магнитных силовых линий. Наибольшее число магнитных силовых линий проводник пересекает,

двигаясь перпендикулярно к ним, когда угол α равен 90°, и синус угла α равен 1, а наименьшее число, когда угол α равен нулю градусов и синус угла α равен 0. В остальных промежуточных положениях число пересекаемых проводником магнитных силовых линий будет пропорционально величине синуса соответствующего угла α.

Непрерывное изменение числа пересекаемых проводником магнитных силовых линий влечет за собой такое же непрерывное изменение (по закону синуса) величины, наведенной в проводнике э. д. с., которая при $\alpha=90°$ будет равна максимальной величине $E_{\text{макс}}$, а при $\alpha=0°$ равна нулю. Для промежуточных значений угла α мгновенные значения э. д. с. могут быть определены по формуле

$$e = E_{\text{макс}} \sin \alpha. \quad (2)$$

Если построить график изменения э. д. с. за один оборот проводника, где по вертикальной оси в определенном масштабе отложить величину э. д. с., а по горизонтальной — величину угла поворота проводника α для значений углов 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 и 360° и эти точки соединить плавной кривой, то полученная кривая, показывающая характер изменения индуктированной в проводнике э. д. с. в зависимости от перемещения проводника по окружности в равномерном магнитном поле, будет иметь вид синусоиды, а изменяющиеся по этому закону э. д. с. и ток будут называться синусоидальными. Максимальные значения э. д. с. и тока, которых они достигают при своем изменении, называются амплитудой э. д. с. и тока. При повороте проводника в магнитном поле на следующие 360°, т. е. при втором обороте, э. д. с. и соответственно ток будут повторять цикл изменений.

Время, в течение которого индуктированная э. д. с. (или ток) совершит полный цикл изменений, изменяясь от нуля до максимальной величины и от максимальной величины до нуля в положительном и отрицательном направлениях, называется периодом, который обычно измеряется в секундах и обозначается буквой T, а число периодов в единицу времени, т. е. в секунду, называется частотой и измеряется в герцах, где 1 *гц* есть один период в секунду.

В СССР стандартной частотой переменного тока принято 50 периодов в секунду (50 *гц*), откуда время одного периода можно вычислить по формуле

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{50}=0{,}02\ сек.$$

При вращении в магнитном поле двух проводников, расположенных диаметрально и соединенных между собой последовательно, э. д. с. в них будет изменяться как и при одном проводнике, с той лишь разницей, что в витке величина э. д. с. будет в аналогичных точках окружности в 2 раза больше, чем в одном проводнике.

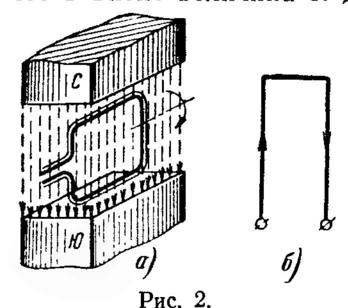


Рис. 2.

а — вращение витка в магнитном поле; *б* — направление э. д. с. в сторонах витка.

На рис. 2,*а* показан виток в момент прохождения его проводников под серединами полюсов. Наводимые в проводниках э. д. с. имеют в данное мгновение максимальную величину, так как оба проводника пересекают магнитные силовые линии под углом 90°. Кроме того, во всех положениях этого витка э. д. с. проводников имеют противоположное направление и поэтому складываются (рис. 2,*б*).

Из сказанного следует, что для получения значительной по величине э. д. с. необходимо брать не один провод и не один виток, а много последовательно соединенных витков, представляющих собой уже катушку, и вращать их в магнитном поле. На этом принципе основано получение однофазного переменного тока.

Если взять не один виток или катушку, а три, расположив их по окружности со сдвигом на 120°, и вращать в магнитном поле, то в каждой из них э. д. с. получится сдвинутой по времени одна относительно другой на $^1/_3$ периода. При подключении к каждой из этих катушек нагрузки получаются три самостоятельные цепи однофазного переменного тока, нулевые значения и амплитуды которых сдвинуты на $^1/_3$ периода. Для подключения нагрузки к трем отдельным катушкам потребовалось бы подвести шесть проводов — три от источ-

ника тока к нагрузке и три от нагрузки к источнику тока (рис. 3). Такую систему трех однофазных токов называют несвязанной системой трехфазного тока. Практически такая система невыгодна из-за большого расхода меди. Пользуясь известным из электротехники положением, что сумма мгновенных значений токов в системе трехфазного тока равна нулю, три обратных провода заменяют одним проводом, соединив их концы в одну точку. Полученная система токов называется связанной системой трехфазного тока или трехфазной системой (рис. 4), а каждая отдельная цепь этой системы — фазой. При равномерной нагрузке фаз можно обойтись и без нулевого провода. В этом случае фазы источника трехфазного тока соединяют звездой (рис. 5,*а*) или треугольником (рис. 5,*б*).

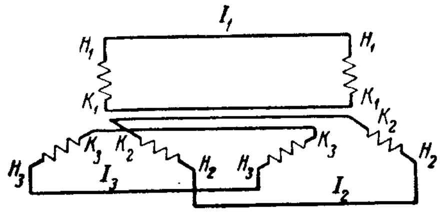


Рис. 3. Несвязанная система трехфазного тока.

Дадим теперь обобщенное определение трехфазного тока.

Трехфазным током называют многофазную систему, которая состоит из трех однофазных токов одинаковой частоты, где токи каждой фазы сдвинуты между собой по времени на $^1/_3$ периода.

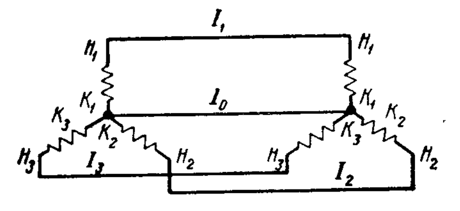


Рис. 4. Связанная система трехфазного тока.

На рис. 6 приведены принципиальная схема генератора трехфазного переменного тока, имеющего два полюса, и график изменения э. д. с. Здесь все три фазы обмотки показаны сосредоточенно в виде трех витков, расположенных по окружности статора со сдвигом на угол 120°. Магнитное поле создается ротором, имеющим на полюсах обмотку возбуждения и вращаемым посторонним двигателем, например гидротурбиной, паротурбиной, дизелем и т. п. Вместе с вращением

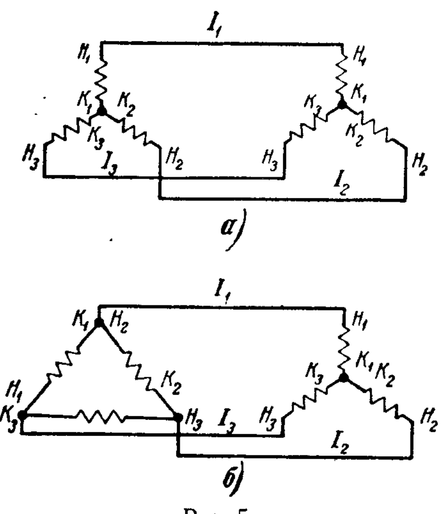


Рис. 5.
а — соединение источника трехфазного тока звездой; *б* — соединение источника трехфазного тока треугольником.

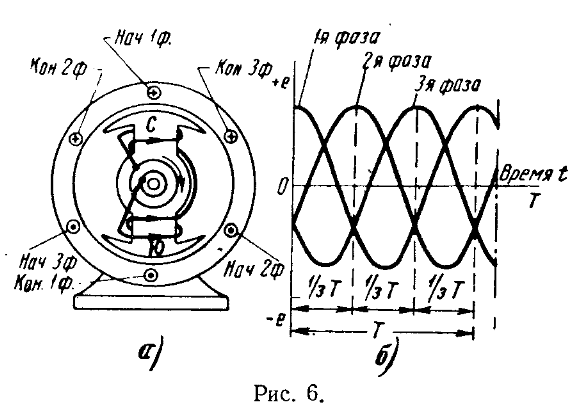


Рис. 6.
а — схема двухполюсного генератора трехфазного переменного тока; *б* — синусоида э. д. с.

полюсов вращается и создаваемое ими магнитное поле, магнитные силовые линии которого пересекают неподвижные проводники обмотки статора генератора, наводя в каждой фазе переменные э. д. с., сдвинутые по времени между собой на $^1/_3$ периода.

Трехфазные генераторы обычно конструируются так, чтобы полюсы с катушками возбуждения, питаемые постоянным током, были расположены на вращающейся части машины (роторе), а генерирующая обмотка — в пазах неподвижной части (статоре). Иногда встречаются генераторы небольшой мощности с расположением полюсов возбуждения на неподвижной части машины (станине), а генерирующей обмотки — на вращающейся части (роторе). В первом случае магнитные силовые линии, выходящие из вращающихся полюсов, пересекают неподвижные провода генерирующей обмотки, расположенной в статоре, а во втором случае провода генерирующей обмотки, расположенные в роторе, пересекают магнитные силовые линии, выходящие из неподвижных полюсов. В обоих случаях в обмотке переменного тока наводится (генерируется) трехфазная переменная э. д. с.

Использование в современных генераторах электромагнитов вместо постоянных магнитов дало возможность получать сильные магнитные поля и соответственно большие э. д. с., что, однако, повлекло за собой неравномерное распределение магнитного потока по всей площади полюсов и вызвало необходимость получения синусоидальной э. д. с. в неравномерном магнитном поле, т. е. потребовалось найти способы получения такого магнитного поля, магнитная индукция которого изменялась бы в воздушном зазоре генератора приблизительно по синусоиде, что решено следующими путями.

В генераторах переменного тока с явно выраженными полюсами применены полюсные наконечники (башмаки) такой формы, чтобы воздушный зазор между полюсом и внутренней поверхностью статора был минимальным посредине и увеличивался от середины к краям полюса. При такой конструкции полюсов магнитная индукция будет иметь максимальную величину посредине полюса и уменьшаться к его краям, а форма кривой магнитной индукции при этом будет приближаться к синусоиде.

В генераторах с неявно выраженными полюсами, у которых величина воздушного зазора неизменна по всей окружности ротора, пазы и обмотка возбуждения в теле цилиндрического ротора так распределяются, что изменение магнитной индукции в воздушном зазоре про-

исходит по синусоиде, а максимальная магнитная индукция посредине полюса убывает к его краям.

Имея в генераторах с явно и неявно выраженными полюсами синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре и перпендикулярное направление магнитных силовых линий в расточке статора, легко вычислить величину э. д. с. для любого положения ротора генератора. Например, при пересечении проводника магнитными силовыми линиями, выходящими из середины полюса и имеющими наибольшую густоту (наибольшую плотность), э. д. с. будет иметь максимальную величину и вычислена по формуле

$$E_{\text{макс}} = B_{\text{макс}} l v \cdot 10^{-8} \ \textit{в}, \qquad (3)$$

где $E_{\text{макс}}$ — максимальное значение э. д. с., *в*;

$B_{\text{макс}}$ — максимальное значение магнитной индукции, *гс*;

v — скорость движения магнитного поля по отношению к проводнику, *см/сек*;

l — длина активной части проводника, *см*;

10^{-8} — множитель для получения э. д. с., в вольтах.

При пересечении проводника нейтральной линией, проходящей между краями полюсов, где магнитная индукция практически будет равна нулю, э. д. с. также будет равна нулю.

Во всех промежуточных положениях ротора величина э. д. с. вычисляется по формуле

$$e = B_{\text{макс}} l v \sin \alpha \cdot 10^{-8} \ \textit{в},$$

или, пользуясь формулой (3),

$$e = E_{\text{макс}} \sin \alpha \ \textit{в},$$

т. е. получается формула (2),
где α — угол поворота ротора[1].

Очевидно, что, вычислив величину э. д. с. для различных углов поворота ротора двухполюсного генерато-

---

[1] За начало отсчета угла поворота ротора следует принимать такое положение ротора, при котором нейтральная линия или, точнее, нейтральная плоскость ротора, проходящая симметрично между краями полюса, пересекает взятый нами для исследования проводник.

ра и построив график изменения э. д. с. за один его оборот, получится такая же синусоида, как на рис. 1.

Для того чтобы частота трехфазного переменного тока генератора была равна 50 *гц*, необходимо ротор вращать с определенной скоростью вращения. При двухполюсном генераторе за один оборот ротора произойдет полный цикл изменения э. д. с., что соответствует одному периоду *T*. Для того чтобы получить частоту э. д. с. и тока равной 50 *гц*, необходимо вращать ротор двухполюсного генератора со скоростью 50 *об/сек*, или

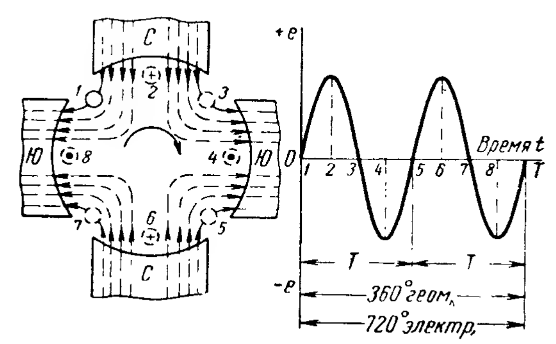


Рис. 7. Изменение э. д. с. в проводнике, вращающемся в магнитном поле, создаваемом четырьмя полюсами.

50·60=3 000 *об/мин*. Для получения этой же частоты в четырехполюсном генераторе его следует вращать со скоростью, вдвое меньшей, чем двухполюсный. Это явление связано с тем, что при четырехполюсном роторе полный цикл изменения э. д. с. генератора произойдет за полоборота, так как виток успеет пройти за это время под северным и южным полюсами, а при одном обороте э. д. с. будет иметь два полных цикла, т. е. два периода.

На рис. 7 показаны изменение э. д. с. проводника, вращающегося в магнитном поле, создаваемом четырьмя полюсами, и график изменения э. д. с. за один оборот. Если при двух полюсах 360 *геометр·град.* соответствовали одному периоду *T*, то при четырех полюсах ему уже будут соответствовать 180 *геометр. град.* Отсюда возникло понятие об электрических градусах.

В двухполюсном генераторе геометрические и электрические градусы совпадают, так как за один оборот

2—2188

ротора э. д. с. совершает полный цикл изменения и имеет один период. Здесь 360 *геометр. град.* равны 360 *эл. град.*

В четырехполюсном генераторе полный цикл изменения э. д. с. происходит при повороте ротора на 180 *геометр. град.*, где один период получается за пол-оборота ротора, поэтому 180 *геометр. град.* здесь соответствуют 360 *эл. град.*

В шестиполюсном генераторе 120 *геометр. град.* соответствуют 360 *эл. град.* и т. д.

Таким образом, полный оборот ротора соответствует: в двухполюсном генераторе — 360 *эл. град.*, в четырехполюсном — 720, а в шестиполюсном — 1 080 *эл. град.* и т. д. Из приведенного следует, что при увеличении числа полюсов генератора его необходимо вращать с меньшими скоростями, чтобы этим обеспечить стандартную частоту $f=50$ *гц*.

Требуемое число оборотов определяется по формуле

$$n=\frac{60f}{p}, \tag{4}$$

где n — число оборотов ротора в минуту;
f — частота в герцах;
p — число пар полюсов генератора.

Например, при шестиполюсном генераторе его скорость вращения при частоте, равной 50 *гц*, будет:

$$n=\frac{60\cdot 50}{3}=\frac{3\,000}{3}=1\,000 \text{ об/мин.}$$

Полученная по этой формуле скорость вращения называется синхронной.

Как известно, для протекания тока в замкнутой электрической цепи необходимо наличие э. д. с., которая поддерживает разность потенциалов, т. е. напряжение на зажимах источника электрической энергии.

Всякий проводник имеет то или иное сопротивление протеканию электрического тока. Величина сопротивления протекания постоянного и переменного тока одного и того же проводника неодинакова. При переменном токе имеет место так называемый поверхностный эффект, т. е. вытеснение тока от центра проводника к его поверхности; поверхностные слои проводника пропускают

большее количество электричества (электронов), внутренняя часть проводника—меньшее, а центральная часть проводника почти не участвует в процессе протекания электрического тока. В результате такого неравномерного распределения по сечению проводника электрического тока общее сопротивление проводника переменному току будет больше, чем сопротивление постоянному току. С увеличением частоты переменного тока поверхностный эффект проявляется еще сильнее.

Кроме явления поверхностного эффекта, большое влияние на процесс протекания электрического тока в цепях переменного тока оказывают индуктивность и емкость проводников, почему и сопротивления всех проводников (нагрузок) делятся на активные, индуктивные, емкостные и смешанные.

Чисто активное сопротивление практически имеют электрические лампы накаливания, спирали электронагревательных приборов, электрических печей и т. п. Сопротивление перечисленных выше проводников постоянному току часто называют омическим сопротивлением. Величина сопротивления проводников постоянному току вычисляется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (5)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника, *ом·мм²/м*;
l — длина проводника, *м*;
s — сечение проводника, *мм²*.

Проводники с активным сопротивлением потребляют из сети активную мощность, расходуемую на нагрев проводника.

Индуктивное сопротивление имеют катушки индуктивности, изготавливаемые из провода с ничтожным по величине активным сопротивлением и большим числом витков. Величиной активного сопротивления в катушках индуктивности пренебрегают и считают, что практически они имеют только индуктивное сопротивление. Индуктивность, а значит, и индуктивное сопротивление катушки тем больше, чем больше ее диаметр, чем меньше ее длина при том же числе витков и чем больше число витков в ней. Индуктивное сопротивление катушек индуктивности и других проводников, имеющих индуктивное сопротивление, возрастает с увеличением частоты пере-

менного тока, а также если внутрь их ввести стальной сердечник.

Катушки индуктивности активной мощности почти не потребляют; они потребляют реактивную мощность, расходуемую при намагничивании катушки и возвращаемую обратно в сеть при ее размагничивании. Поэтому индуктивное сопротивление называют еще реактивным сопротивлением.

Емкостное сопротивление имеет конденсатор, величина которого уменьшается с увеличением его емкости

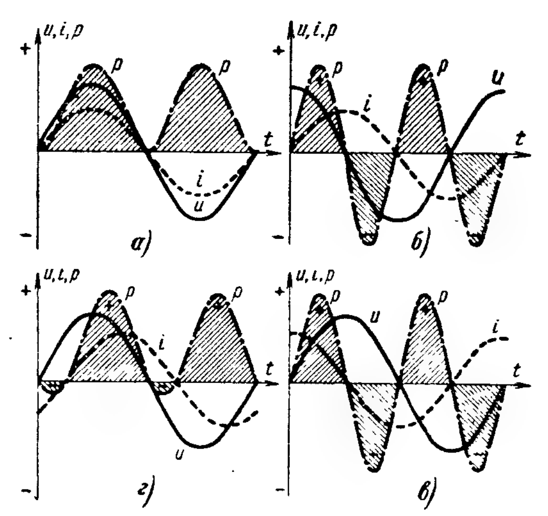


Рис. 8. График мгновенной мощности напряжения и тока.
а — цепи с активным сопротивлением; *б* — цепи с индуктивным сопротивлением; *в* — цепи с емкостным сопротивлением; *г* — цепи с активным и индуктивным сопротивлением.

и частоты сети. Конденсаторы активной мощности практически не потребляют, а только реактивную, расходуемую на заряд конденсатора и возвращаемую обратно в сеть при разрядке. Емкостное сопротивление, так же как и индуктивное, называется реактивным.

Смешанным сопротивлением проводника называется такое сопротивление, которое состоит из активного и реактивного сопротивлений. На практике чаще всего встречаются активно-индуктивные сопротивления, так как обмотки электрических машин и трансформаторов являются именно такими сопротивлениями.

Если подключить проводник с активным сопротивлением к источнику переменного тока, напряжение которого изменяется по синусоиде, то возникший при этом ток также будет изменяться по синусоиде, где при активном сопротивлении электрической цепи напряжение и ток будут одновременно достигать положительного и отрицательного максимальных значений и одновременно проходить через нулевые значения. Если подобрать соответствующий масштаб для напряжения и тока и построить график изменения напряжения и тока по времени, то обе синусоиды совпадут во всех своих точках. В таких случаях принято говорить, что фазы напряжения и тока совпали или что сдвиг фаз между напряжением и током равен нулю. Здесь под словом фаза понимают не часть обмотки электрической машины, а состояние периодически изменяющейся величины, т. е. состояние синусоидального колебания напряжения и тока.

На рис. 8,*а* приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи с активным сопротивлением. Напряжение и ток совпадают по фазе. Мощность совершает полный цикл изменения за полпериода, а за период совершает два цикла, где обе кривые имеют положительное [1] значение.

Положительное значение мощности подтверждает то, что вся мощность является активной и полностью используется (потребителем) для полезной работы.

Если взять проводник с индуктивным сопротивлением, например катушку индуктимвности, и подключить ее к источнику переменного тока, напряжение которого изменяется по синусоиде, то и ток будет изменяться по синусоиде, но нулевые и максимальные значения напряжения и тока уже не совпадут, а ток будет отставать от напряжения на $^1/_4$ периода, что соответствует сдвигу фазы на угол $\varphi=90°$.

На рис. 8,*б* приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи с индуктивным сопротивлением. Рассматривая кривую мощности, видно, что в первую и третью четверти периода мощность име-

[1] Мгновенная мощность равна алгебраическому произведению мгновенного напряжения на мгновенный ток. При положительных или отрицательных значениях и напряжения и тока мощность положительна, при разных значениях напряжения и тока мощность отрицательна.

ет положительное значение, а во вторую и четвертую четверти периода — отрицательное значение. Та часть мощности, которая имеет положительное значение, забирается из сети и расходуется на намагничивание катушки индуктивности, а та, которая имеет отрицательное значение, создается катушкой при ее размагничивании и направляется в сеть к источнику электрической энергии. Поскольку положительная и отрицательная мощности равны, катушка индуктивности, а следовательно, и все проводники с чисто индуктивным сопротивлением активной мощности не потребляют, а потребляют только реактивную мощность, которая в одну определенную часть периода забирается из сети, а в другую часть периода возвращается обратно в сеть, загружая этим источник электрической энергии и линии электропередачи. Здесь следует знать, что чисто индуктивных сопротивлений не бывает, поэтому какая-то незначительная часть активной мощности потребляется проводником, имеющим индуктивное сопротивление, на нагрев проводов.

Если взять емкостное сопротивление, например конденсатор, и подключить его к источнику переменного тока, напряжение которого изменяется по синусоиде, то ток также будет изменяться по синусоиде, однако при чисто емкостной нагрузке он будет опережать напряжение на $^1/_4$ периода, т. е. сдвиг фаз между напряжением и током будет равен 90°.

На рис. 8 приведен график мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи с емкостным сопротивлением. Здесь, как и при индуктивном сопротивлении, в первую и третью четверти периода мощность имеет положительное значение, а во вторую и четвертую четверти периода—отрицательное значение. Это означает, что в начале каждого полупериода конденсатор забирает из сети электрическую энергию, расходуя ее на создание электрического поля, — происходит заряд конденсатора, а в конце каждого полупериода происходит его разряд и он отдает запасенную в нем электрическую энергию обратно в сеть. Следовательно, активной мощности емкостное сопротивление не потребляет, а только реактивную, которая непроизводительно загружает как линию электропередачи, так и источник электрической энергии.

На рис. 8,*г* приведен график мгновенных значений

напряжения, тока и мощности для цепи со смешанным сопротивлением, состоящим из активного и индуктивного сопротивлений. Соотношение величин активного и индуктивного сопротивлений взято такое, чтобы сдвиг фаз между напряжением и током был равен 45°, или $^1/_8\,T$.

Из графика рис. 8,*г* видно, что при смешанной активно-индуктивной нагрузке преобладающая часть мощности имеет положительное значение и только некоторая часть мощности имеет отрицательное значение. Это свидетельствует о том, что в данной цепи проводник потребляет и активную и реактивную мощность, причем соотношение между этими мощностями зависит от сдвига фаз между напряжением и током, что в свою очередь определяется величиной активного и индуктивго сопротивлений.

На графиках рис. 8 сдвиг фаз между напряжением и током для большей наглядности выражен в долях периода *T*. Если выразить сдвиг фаз между напряжением и током в градусах и построить угол, соответствующий сдвигу фаз, то получится характерный в электротехнике угол φ, косинус которого показывает в долях единицы или при умножении на 100 в процентах количество активной мощности (или энергии), потребляемой проводником. Косинус φ называется еще коэффициентом мощности.

Потребляемая проводником (нагрузкой) активная мощность при однофазном токе вычисляется по формуле

$$P = UI\cos\varphi\ \textit{вт}, \qquad (6)$$

где U и I — действующие[1] значения напряжения и тока.

При трехфазном токе потребляемая проводником (нагрузкой) активная мощность вычисляется по формуле

$$P = 3U_{ф}I_{ф}\cos\varphi\ \textit{вт}, \qquad (7)$$

где $U_ф$ и $I_ф$ — действующие значения фазного напряжения и фазного тока.

[1] Действующим значением переменного тока называется такой постоянный ток, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за одно и то же время одинаковое количество теплоты. Действующее значение переменного тока меньше амплитудного значения в $\sqrt{2}$ раз, т. е. в 1,41 раза. Действующее значение напряжения переменного тока меньше амплитудного значения также в 1,41 раза.

Произведение UI при однофазном токе и $3U_ф I_ф$ при трехфазном токе представляют собой полную или кажущуюся мощность, которая является суммой активной и реактивной мощности, потребляемой проводником (нагрузкой).

При чисто активном сопротивлении нагрузки угол $\varphi=0°$, где $\cos\varphi=1$, и активная мощность равна будет:

$$P=UI\cos\varphi=UI\cdot 1=UI \text{ вт.}$$

При чисто индуктивной и чисто емкостной нагрузке угол $\varphi=90°$, где $\cos\varphi=0°$, и активная мощность будет равна:

$$P=UI\cos\varphi=0.$$

При смешанной активно-индуктивной нагрузке и сдвиге фаз на $^1/_8\,T$ (рис. 8,*г*) угол $\varphi=45°$, где $\cos\varphi=0{,}707$, и активная мощность равна:

$$P=UI\cos\varphi=0{,}707UI \text{ вт.}$$

Последняя формула показывает, что если полную (кажущуюся) мощность принять за единицу, то для заданного сдвнга фаз активная мощность составляет 0,707 единицы; если полную мощность принять за 100%, то активная мощность составляет 70,7%. Величина реактивной мощности в долях единицы будет равна $P_р=1-0{,}707=0{,}293$, а в процентах $P_р=100-70{,}7=29{,}3\%$.

Из приведенных формул видно, что чем больше сдвиг фаз между напряжением и током в электрической цепи и чем меньше коэффнциент мощности, тем потребляемая цепью активная мощность будет меньше, а реактивная — больше и, наоборот, чем меньше сдвиг фаз между напряжением и током и чем больше коэффициент мощности, тем больше и потребляемая цепью активная мощность и меньше реактивная.

Существует ряд мер по ограничению потребления реактивной мощностн, влияющих на повышение коэффициента мощности. Высокий коэффициент мощности ($\cos\varphi$) является важной общенародной государственной задачей.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Действие асинхронного трехфазного электродвигателя основано на принципе взаимодействия вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора при питании ее трехфазным переменным током, и магнитного поля, создаваемого током ротора.

Если поместить проводник в магнитное поле, создаваемое полюсами постоянного магнита, и пропустить через него постоянный ток (рис. 9,*а*), то он будет выталкиваться из магнитного поля силой, пропорциональной величине тока, длине активной части проводника и магнитной индукции. Направление движения проводника определяется по правилу левой руки, которое можно сформулировать следующим образом: если расположить ладонь левой руки так, чтобы магнитные силовые линии, выходящие из северного полюса, входили в нее, а четыре вытянутых пальца показывали направление тока, то большой отогнутый палец покажет направление движения проводника.

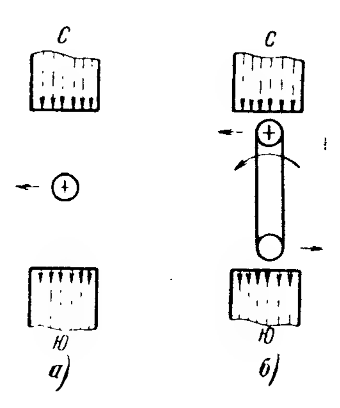


Рис. 9. Опыты с взаимодействием магнитных полей.

Если взять два проводника, соединенных в лобовой части, образуя виток (рис. 9,*б*), и пропустить через них постоянный ток, то верхний проводник будет выталкиваться влево, а нижний — вправо, т. е. получится в виде вертушки, вращающейся против часовой стрелки. При изменении направления тока так называемая вертушка будет вращаться по часовой стрелке.

Если взять статор асинхронного трехфазного электродвигателя и подключить его к сети трехфазного переменного тока, положив на поверхность его расточки стальной шарик, то он начнет вращаться по окружности расточки самостоятельно или после легкого толчка.

Если поместить внутрь расточки статора вертушку из медных проводов в виде беличьего колеса, она также

будет вращаться. Этот опыт показывает, что в статоре электродвигателя, подключенном к электрической сети трехфазного тока, образовалось вращающееся магнитное поле.

Для уяснения, каким образом в статоре, питаемом трехфазным током, образовалось вращающееся магнитное поле, следует рассмотреть процесс изменения трех-

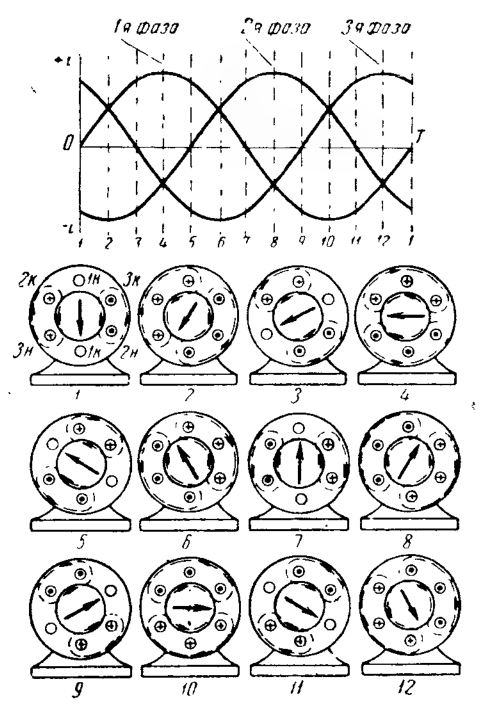


Рис. 10. Схема получения вращающегося магнитного поля.

фазного переменного тока по синусоиде. Если изобразить схематически трехфазную обмотку статора двухполюсного электродвигателя, имеющего шесть пазов, фазы обмотки которого имеют по одной катушке, расположенной друг от друга по окружности статора на 120°, и соединить концы фаз C_4, C_5 и C_6 вместе (соединение в звезду), а начала C_1, C_2, C_3 подключить к трехфазной сети, то в обмотке статора будет проходить трехфазный

переменный ток, который будет изменяться по синусоиде (рис. 10). Если разделить время, равное одному периоду *T*, на 12 равных частей (каждая часть будет соответствовать 30 *эл. град.*) и обозначить намеченные моменты времени порядковыми номерами, вычертив в каждом макете статора схему расположения фаз обмотки, а крестиками и точками показать направления токов, то можно определить и направление результирующего магнитного потока в намеченные моменты времени. Как известно, направление магнитных силовых линий, образующихся вокруг проводника, по которому протекает ток, и расположенных вокруг него концентрически в виде замкнутых окружностей, определяется по правилу буравчика. Если острие буравчика расположить в направлении движения тока и вращать его так, чтобы он врезался в пространство или материал, то направление вращения рукоятки буравчика покажет направление магнитных силовых линий. Если в двух рядом лежащих катушках обмотки направление токов будет совпадать, то эти две катушки должны быть охвачены общей магнитной линией, имеющей такое же направление, как и магнитные линии отдельных катушек. Выполнив указанные построения, получится направление результирующего магнитного потока, показанного жирной стрелкой (рис. 10) для каждого выбранного момента времени. Из анализа направления результирующего магнитного потока в моменты времени от $t=0$ до $t=T$ видно, что магнитный поток с течением времени поворачивается по часовой стрелке и за время, равное полному периоду, совершает один оборот. Это и является наглядным доказательством того, что в статоре, имеющем трехфазную обмотку и подключенном к трехфазной сети, образовалось вращающееся магнитное поле, которое в двухполюсном статоре за один период *T* совершает один оборот. Если построить графическую схему для четырехполюсного статора, можно убедиться в том, что вращающееся магнитное поле за один период *T*, равный при частоте сети 50 *гц* 0,02 *сек*, совершит полоборота, а при шестиполюсном статоре — $^1/_3$ оборота и т. д. Этим и объясняется, почему электродвигатели по мере увеличения числа полюсов становятся более тихоходными.

Если взять замкнутый виток, свободно вращающийся по оси, и вращать подковообразный постоянный маг-

нит так, чтобы магнитный поток, создаваемый этим магнитом, пересекал активные[1] стороны витка (рис. 11), то полученное таким путем вращающееся магнитное поле по закону электромагнитной индукции будет наводить в проводниках витка э. д. с. Если бы проводники витка были соединены только с одной стороны, то в них тока не возникло бы и виток остался бы неподвижным. В замкнутом же витке ток будет создавать и свое магнитное поле. В результате взаимодействия этих двух магнитных полей возникнет электромагнитная сила, которая заставит виток вращаться в сторону вращения магнитного поля. Скорость вращения замкнутого витка будет несколько меньше и не равной скорости вращения магнитного поля, иначе не было бы явления пересекания проводниками витка магнитных силовых линий и не было бы индуктирования в нем э. д. с.

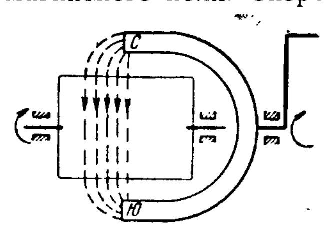


Рис. 11. Вращение замкнутого витка в магнитном поле, создаваемом при вращении постоянного магнита

Такое вращение витка или системы витков называется вращением с асинхронной скоростью.

Принцип работы асинхронного электродвигателя заключается в том, что при его подключении к трехфазной сети в обмотке статора проходит трехфазный переменный ток, изменяющийся по синусоиде, что является причиной образования в электродвигателе вращающегося магнитного поля. Вращающееся магнитное поле, пересекая провода обмотки неподвижного ротора, наводит в ней э. д. с. Поскольку обмотка ротора является замкнутой цепью, в ней появляется ток. Ток ротора создает магнитное поле ротора, которое, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает электромагнитную силу, заставляющую ротор вращаться в сторону движения вращающегося магнитного поля. Как показано на рис. 11, ротор при вращении всегда несколько отстает от вращающегося магнитного поля, причем это отста-

---

[1] Активными сторонами витка в данном случае являются те, которые расположены в горизонтальной плоскости (перпендикулярно направлению магнитных силовых линий) в зоне действия магнитного потока.

вание, называемое скольжением, при холостом ходе меньше, а при нагрузке больше.

Скорость вращения вращающегося магнитного поля называется **синхронной скоростью**, а скорость вращения ротора, изменяющаяся при данной частоте сети в зависимости от нагрузки электродвигателя, называется **асинхронной скоростью**, что и явилось основанием для названия таких электродвигателей асинхронными.

Синхронная скорость вращающегося магнитного поля определяется по формуле (4).

При стандартной частоте сети $f=50$ *гц* синхронная скорость вращения электродвигателя для различного числа пар полюсов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Число пар полюсов	Количество полюсов	Синхронная скорость вращения, *об/мин*
1	2	3 000
2	4	1 500
3	6	1 000
4	8	750
5	10	600
6	12	500

Понятие «скольжение»

Скольжение есть отношение разности чисел скорости вращающегося магнитного поля n_1 и ротора n_2 к скорости вращающегося магнитного поля:

$$s=\frac{n_1-n_2}{n_1},$$

где s — скольжение в долях единицы;

n_1 — скорость вращения магнитного поля, *об/мин*;

n_2 — скорость вращения ротора, *об/мин*.

Для получения величины скольжения в процентах следует умножить величину скольжения на 100:

$$s=\frac{n_1-n_2}{n_1}\cdot 100\ \%. \qquad (8)$$

При холостом ходе электродвигателя скольжение незначительное, так как без нагрузки скорость вращения мало отличается от скорости вращения магнитного поля. С ростом же механической нагрузки скорость вращения электродвигателя уменьшается и соответственно увеличивается скольжение. Величина скольжения при номинальной нагрузке для различных типов электродвигателей находится в пределах 1,5—8%.

3. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. СПОСОБЫ ПУСКА

Основными деталями асинхронного электродвигателя являются неподвижная часть — статор и подвижная — ротор.

Статор состоит из чугунной или алюминиевой станины, сердечника (пакета) и обмотки, называемой обмоткой статора.

Ротор состоит из сердечника (пакета), напрессованного на вал, двух нажимных шайб и обмотки, называемой обмоткой ротора.

Сердечники статора и ротора набираются из отдельных листов электротехнической стали толщиной обычно до 0,5 *мм*. Для уменьшения потерь на вихревые[1] токи листы стали сердечников изолируются друг от друга лаковой пленкой или слоем окисла, образующегося на листах в оксидировочной установке. В двигателях малой мощности изоляцией иногда служит слой окалины.

Между пакетом статора и пакетом ротора имеется воздушный зазор, величина которого для электродвигателей мощностью до 100 *квт* находится в пределах от 0,25 до 1 *мм*, возрастая с увеличением мощности и скорости вращения.

Вал ротора вращается в подшипниках качения и — реже — в подшипниках скольжения, расположенных в подшипниковых щитах, которые крепятся болтами к станине статора.

---

[1] Вихревыми токами называются электрические токи, возникающие в массивных стальных сердечниках, кожухах и других металлических частях вследствие наведения в них э. д. с. переменным магнитным потоком. Вихревые токи вызывают дополнительный нагрев электродвигателя.

Роторы в зависимости от типа обмотки делятся на короткозамкнутые и фазные.

Обмотки короткозамкнутых роторов имеют форму беличьего колеса, состоящего из стержней и двух противоположно расположенных короткозамыкающих колец, получаемых путем заливки пазов сердечника ротора алюминием или путем укладки голых медных стержней с медными короткозамыкающими кольцами, соединяемых автогенной сваркой.

Обмотки фазных роторов существенного отличия от обмоток статоров не имеют и выполняются изолированным проводом или стержнями, концы фаз которых соединяются в звезду или треугольник, а начала фаз выводятся к расположенным на валу стальным или латунным контактным кольцам, изолированным от вала и друг от друга. Для более плавного пуска к контактным кольцам подключается реостат, который уменьшает величину пускового тока и увеличивает пусковой момент вращения. Сопротивление пускового реостата подбирается так, чтобы сумма активных сопротивлений реостата и обмотки ротора не превышала суммы индуктивных сопротивлений обмотки ротора и статора[1], в противном случае при дальнейшем уменьшении пускового тока пусковой момент вращения также будет уменьшаться. Электродвигатели с фазным ротором имеют, за редким исключением, щеткоподъемный механизм и короткозамыкающее устройство для замыкания обмотки ротора, минуя реостат, и для подъема щеток с контактных колец в целях уменьшения их износа при вращении ротора. Схема подключения пускового реостата в цепь фазного ротора приведена на рис. 12.

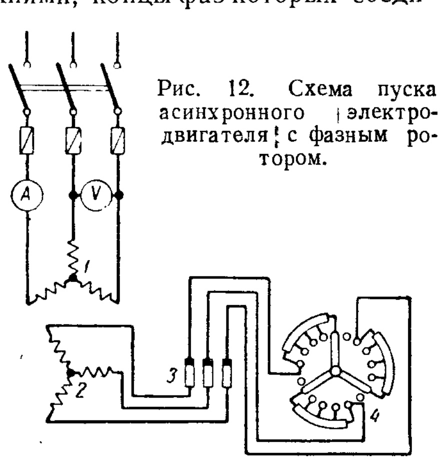


Рис. 12. Схема пуска асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

[1] Активные и индуктивные сопротивления цепи ротора берутся приведенными к числу витков фазы обмотки статора.

На рис. 13 приведен электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа А42-4 мощностью 2,8 *квт* защищенного исполнения со станиной на лапах.

На рис. 14 приведен этот же электродвигатель в разобранном виде. Станина *1* представляет собой чугунную оболочку, в которую запрессован сердечник статора, имеющий обмотку, показанную со стороны схемы. Выводы *4* обмотки статора выходят через два отверстия, расположенные в правой части станины (если смотреть

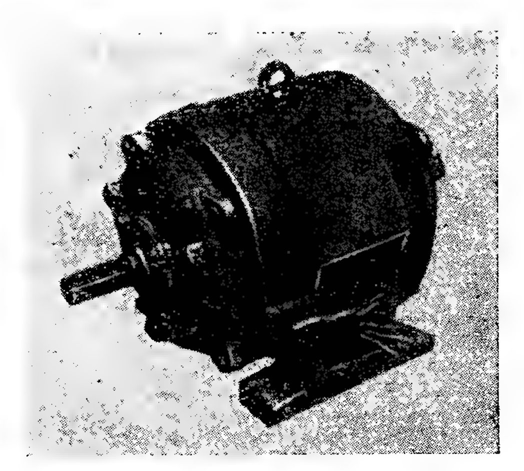


Рис. 13. Электродвигатель типа А42-4 мощностью 2,8 *квт*. Общий вид.

со стороны привода), в коробку выводов *3*. Станина статора имеет с обеих сторон вентиляционные окна *5*. В верхней части станины закреплено на резьбе подъемное кольцо (рым) *6*. На лапах *2* станины имеется по два болтовых отверстия для крепления электродвигателя на месте установки. Ротор *7* состоит из вала и сердечника с короткозамкнутой алюминиевой обмоткой и вентиляционными крыльями, составляющими одно целое с клеткой ротора. С передней и задней сторон вала ротора расположены внутренние фланцы *9* и шарикоподшипники *10*. Каждый внутренний фланец имеет три жестко закрепленные шпильки, с помощью которых гайками *16* прикрепляются к подшипниковым щитам наружные фланцы *11*. Передний подшипниковый щит *12* и задний

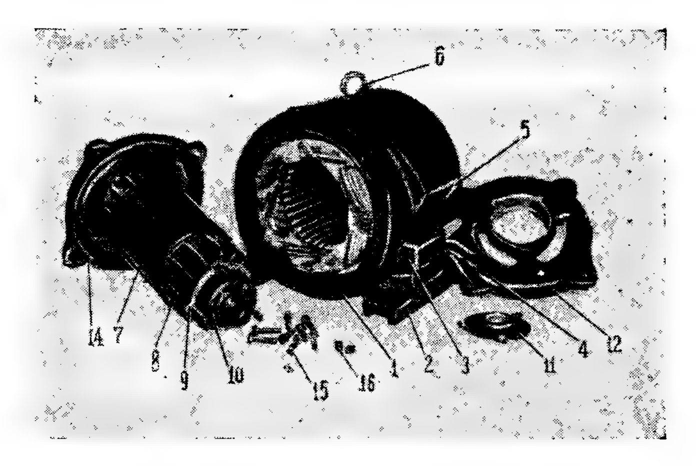


Рис 14. Электродвигатель типа А42-4 мощностью 2,8 *квт* в разобранном виде.

подшипниковый щит *14* имеют по три вентиляционных окна и по четыре отверстия в проушинах, через которые проходят болты *15*, скрепляющие подшипниковые щиты со станиной статора.

Наружные фланцы и подшипниковые щиты имеют по три отверстия, через которые проходят шпильки внутренних фланцев. Вал ротора с обоих концов имеет шейки, а подшипниковые щиты имеют расточки, являющиеся посадочными местами для шарикоподшипников.

На рис. 15 приведен электродвигатель с фазным ротором типа Т с подшипниками скольжения мощностью 29 *квт*, 750 *об/мин*, в правой части которого находятся щеткоподъемный механизм и короткозамыкающее устройство.

На рис. 16 приведен этот же электродвигатель, но в разобранном виде.

Способ пуска короткозамкнутых электродвигателей

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором в большинстве случаев подключаются непосредственно к сети при помощи трехполюсного рубильника, пакетного выключателя, пускового ящика, магнитного пускателя, контактора и т. п.

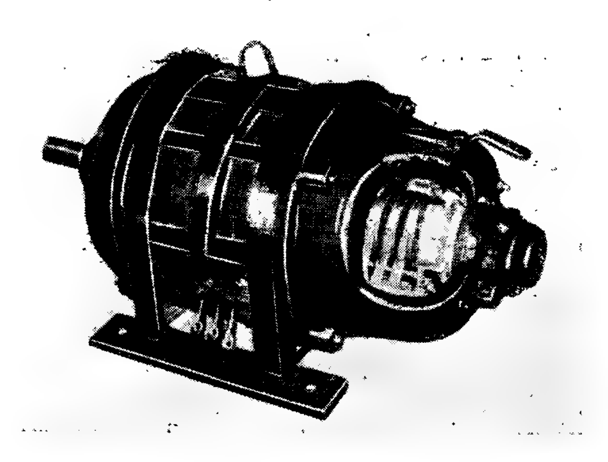


Рис. 15. Электродвигатель типа Т мощностью 29 *квт*. Общий вид.

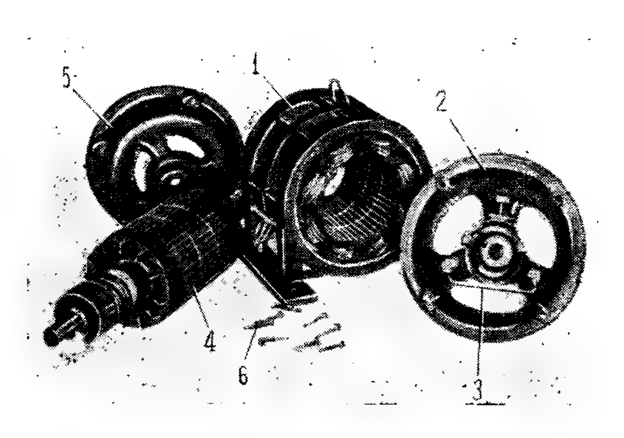


Рис. 16. Электродвигатель типа Т мощностью 29 *квт* в разобраином виде.

Недостатком такого прямого включения является большой пусковой ток, достигающий для электродвигателей до 100 *квт* 5—7-кратной величины номинального тока, вредно отражающийся на электродвигателе и питающей электросети, вызывая недопустимое по величине падение напряжения в ней. Для уменьшения пускового тока чаще всего применяются следующие схемы включения.

Переключение обмотки статора со звезды на треугольник показано на рис. 17. Данная схема применяется в тех случаях, когда обмотка статора в рабочем состоянии соединена в треугольник. Для осуществления схем переключения обмотки статора электродвигателя со звезды на треугольник применяют специальные трехполюсные переключатели, которые при положении включающих ножей в положение «пуск» замыкают обмотку статора в звезду, а при положении «работа» замыкают ее в треугольник. Переключение на треугольник производится после того, как электродвигатель развернется до полной скорости вращения.

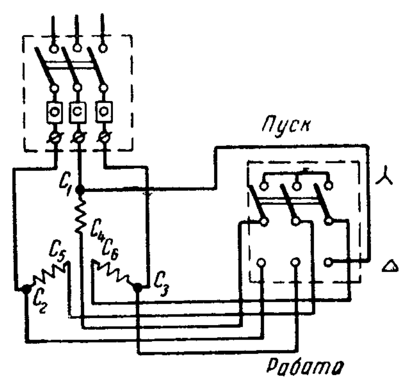


Рис. 17. Схема включения трехфазного электродвигателя с переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

При способе пуска с переключением со звезды на треугольник пусковой ток уменьшается в 3 раза, так как при этом фазное напряжение обмотки статора равно линейному ($U_{ф\Delta} = U_{л\Delta}$), а при включении звездой фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного ($U_{ф\curlywedge} = U_{л\curlywedge} : \sqrt{3}$) Уменьшив таким образом фазное напряжение в $\sqrt{3} = 1{,}73$ раза, тем самым уменьшается и фазный ток в 1,73 раза. Кроме того, при соединении схемы обмотки звездой линейный ток уже равен фазному ($I_{л\curlywedge} = I_{ф\curlywedge}$), а при соединении треугольником линейный ток будет больше фазного в 1,73 раза ($I_{л\Delta} = I_{ф\Delta}\sqrt{3}$).

Следовательно, при пуске электродвигателя по схеме «звезда» пусковой ток уменьшен в 1,73·1,73 — 3 раза. Одновременно с уменьшением пускового тока в 3 раза уменьшается и пусковой момент вращения, поэтому переключение схемы обмотки со звезды на треугольник применяется при пуске электродвигателей без нагрузки.

Пуск короткозамкнутого электродвигателя при помощи автотрансформатора (рис. 18,*а*) уменьшает напряжение, подводимое к электродвигателю; тем самым уменьшается и пусковой ток, а подключение электродвигателя на полное напряжение сети производится при помощи переключателя. При включении переключателя в положение «пуск» электродвигатель включается через автотрансформатор, а при включении переключателя в положение «работа» электродвигатель включается непосредственно в сеть.

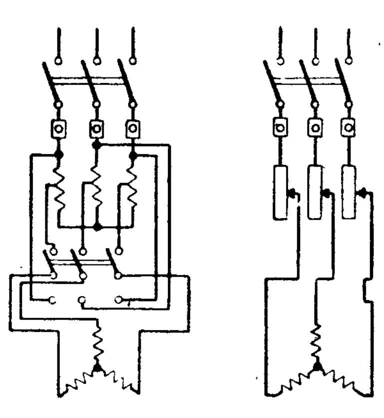


Рис. 18.
а — пуск электродвигателя при помощи автотрансформатора; *б* — пуск электродвигателя с реостатом в цепи статора.

Так как с уменьшением напряжения в первой степени момент вращения электродвигателя уменьшается во второй степени (т. е. в квадрате)), этот способ пуска применяется при включении короткозамкнутых электродвигателей без нагрузки.

Пуск короткозамкнутых электродвигателей при помощи регулируемого пускового реостата, включенного в цепь обмотки статора (рис. 18,*б*), позволяет снизить подведенное к электродвигателю напряжение на величину падения напряжения в реостате. Вследствие уменьшения подведенного к электродвигателю напряжения уменьшается пусковой ток и одновременно уменьшается пусковой момент вращения. Поэтому и этот способ пуска пригоден лишь в том случае, когда электродвигатель пускается в ход без нагрузки.

Все рассмотренные способы пуска короткозамкнутых электродвигателей, кроме непосредственного включения,

основывались на принципе подключения электродвигателя к пониженному напряжению, что наряду с уменьшением пускового тока вызывало уменьшение пускового момента вращения.

Для снижения величин пускового тока при большом пусковом моменте вращения промышленностью выпускаются короткозамкнутые электродвигатели с двойной беличьей клеткой или с глубокими пазами ротора.

Электродвигатели с двойной беличьей клеткой имеют две друг над другом расположенные в специальных пазах короткозамкнутые обмотки ротора, где верхняя обмотка является пусковой, а нижняя — рабочей. Верхняя обмотка изготовляется из специального сплава, обладающего высоким удельным сопротивлением, и имеет большое активное и малое индуктивное сопротивления. Нижняя обмотка изготовляется из меди, имея малое активное и большое индуктивное сопротивления.

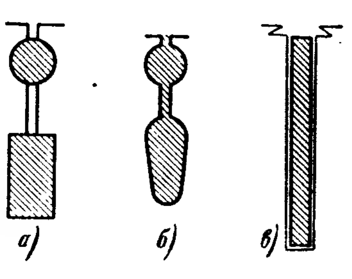


Рис. 19.
а — форма паза двухклеточного электродвигателя; *б* — то же; *в* — форма паза электродвигателя с глубоким пазом.

В некоторых электродвигателях для пусковой и рабочей обмоток применяется одинаковый материал, где разная величина активного сопротивления зависит только от величины сечений стержня пусковой и рабочей обмоток.

Разная величина индуктивных сопротивлений обусловлена тем, что пусковая обмотка расположена ближе к поверхности ротора, а рабочая — дальше от поверхности ротора.

Форма паза электродвигателя с двойной беличьей клеткой показана на рис. 19,*а* и *б*.

В начале пуска, когда частота тока в роторе равна частоте сети, ток в рабочей обмотке момента вращения почти не создается, так как в ней большое индуктивное сопротивление и малое активное, поэтому косинус φ мал и активная мощность незначительна. В начале пуска вращающий момент создает пусковая обмотка, так как она имеет малое индуктивное сопротивление и большое активное сопротивление, поэтому

косинус φ почти равен единице, а активная мощность создает момент вращения, достаточный для пуска электродвигателя. Величину активного и индуктивного сопротивлений пусковой обмотки выбирают так, чтобы получить необходимую кратность пускового момента вращения при определенной кратности пускового тока. С увеличением скорости вращения ротора частота тока в нем уменьшается и вследствие этого уменьшаются индуктивные сопротивления пусковой и рабочей обмоток, доходя до ничтожной величины при нормальной скорости вращения ротора. Ток нагрузки будет распределяться обратно пропорционально активным сопротивлениям, поэтому он почти полностью будет протекать по рабочей обмотке.

Электродвигатели с глубокими пазами ротора имеют обмотку, состоящую из узких, но высоких медных или алюминиевых стержней (рис. 19,*в*).

Для уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента в роторах с глубокими пазами использовано явление вытеснения тока из нижней части проводника в верхнюю, отчего нижняя часть стержня при неподвижном роторе, когда частота в нем равна частоте сети, почти не проводит электрического тока; при этом активное сопротивление стержня увеличивается, а индуктивное — уменьшается. По мере увеличения скорости вращения электродвигателя происходит обратный процесс: активное сопротивление ротора уменьшается, а индуктивное — увеличивается. При нормальной скорости, когда частота тока в роторе мала, вытеснение тока практически прекращается и электродвигатель, ротор которого имеет глубокий паз, работает как электродвигатель нормального исполнения.

Коэффициент мощности электродвигателей, роторы которых имеют двойную беличью клетку или глубокий паз, несколько ниже, чем у обычных короткозамкнутых электродвителей.

ГЛАВА ВТОРАЯ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ВИДЫ ОБМОТОК

4. ЭЛЕМЕНТЫ ОБМОТОК

Обмотки электрических машин состоят из проводников, соединенных в определенной последовательности, и уложенных в пазы пакета стали статора или ротора.

Два провода, расположенные в двух пазах и соединенные между собой по торцу статора или ротора, образуют виток.

Группу витков, уложенных соответствующими сторонами в два паза и соединенных между собой последовательно, называют катушкой. Часто вместо названия «катушка» применяют название «секция».

Число витков в катушке определяется расчетом и может быть равно одному, нескольким десяткам и даже сотням витков.

Для намотки катушек применяется изолированный обмоточный провод круглого или прямоугольного сечения, которое определяется расчетом и зависит от мощности, напряжения, конструкции и назначения электродвигателя. Если при расчете обмотки окажется, что диаметр изолированного провода превышает размер шлица паза, то во избежание выполнения обмотки методом протяжки катушку следует мотать двумя или тремя параллельными проводами с общим сечением, равным расчетному. В этом случае все параллельные провода считаются за один эффективный провод, а их общее сечение называется *«сечением эффективного провода»*.

При наличии параллельных ветвей в обмотке число витков в фазе соответственно увеличивается, т. е. при двух параллельных ветвях число витков в фазе, а значит, и в катушке увеличивается вдвое, при трех параллельных ветвях — втрое и т. д. Соответственно уменьшается сечение провода, однако сечением эффективного провода считается то сечение, которое определено было расчетом, без учета как параллельных проводов, так и параллельных ветвей.

Пример. Расчетное сечение провода обмотки электромотора $F=8{,}4$ *мм*², диаметр 3,28 *мм*. В наличии имеем обмоточный провод диаметром 1,35 *мм* и сечением 1,431 *мм*², что в 6 раз меньше расчетного сечения. Обмотку можно выполнить в три параллельных провода и с двумя параллельными ветвями. В этом случае один элементарный провод будет иметь диаметр 1,35 *мм* и сечение 1,431 *мм*², три элементарных провода будут иметь сечение $3 \times 1{,}431 = 4{,}3$ *мм*², а сечение эффективного провода будет равно:

$$F = 1{,}431 \cdot 3 \cdot 2 = 8{,}6 \text{ мм}^2.$$

При отсутствии параллельных ветвей в обмотке три параллельных элементарных провода составляют один эффективный провод, а при наличии двух параллельных ветвей три элементарных провода в приведенном примере составят лишь $^1/_2$ эффективного провода. Это означает, что при наличии параллельных ветвей число одинарных, двойных или тройных проводов должно быть увеличено во столько раз, сколько имеется параллельных ветвей. Указанное в примере соотношение между сечением эффективного провода и сечением элементарного провода, между числом элементарных проводов и числом эффективных проводов следует учитывать при производстве расчета обмоток.

В катушках обмоток различают активную часть и лобовую часть. Активной частью катушки или провода называется та ее часть, которая расположена в пазу пакета статора или ротора, а лобовой частью — те части, которые расположены вне пакета, т. е. на торцах, и служат лишь для соединения активных частей проводов витка. Необходимо учитывать, что только в активной части проводов индуктируется э. д. с. от основного магнитного потока и создается вращающий момент в электродвигателе, поэтому чрезмерный вылет лобовых частей влечет за собой перерасход меди и других материалов, а также ухудшение электрических свойств электродвигателя.

Фазой обмотки электродвигателя называется часть обмотки с определенным числом катушек, соединенных между собой последовательно, параллельно или смешанно. В трехфазных обмотках начала, концы, а следовательно, и середины фаз сдвинуты одна по отношению к другой на 120 эл. град.

Катушечной группой называются несколько катушек фазы, стороны которых расположены в рядом лежащих пазах (рис. 21). Имеются обмотки, у которых стороны катушечных групп расположены не в рядом лежащих пазах, а через паз. Кроме того, катушечная группа может состоять и из одной катушки. Условные обозначения элементов обмоток на схемах показаны на рис. 20 и 21.

Полюсным делением называется расстояние между осями двух соседних полюсов электродвигателя,

получающихся в обмотке статора при протекании по ней трехфазного переменного тока. В двухполюсном электродвигателе полюсное деление равно 180 *геометр. град.*, в четырехполюсном — 90°, в шестиполюсном — 60° и т. д. Полюсное деление измеряется, кроме геометрических

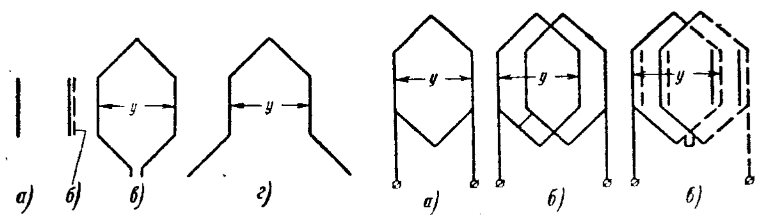


Рис. 20. Условные обозначения элементов обмоток.

Рис. 21. Условные обозначения элементов обмоток.

градусов, и в зубцовых делениях и числом пазов на полюс и фазу. Полюсное деление при любом числе пар полюсов равно 180 *эл. град.*, так как два полюса в трехфазном электродвигателе соответствуют 360 *эл. град.* Полюсным делением называется и часть дуги внутренней окружности (расточки) статора, приходящаяся на один полюс (рис. 22). Обозначается полюсное деление τ.

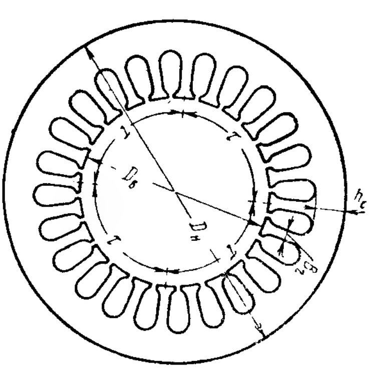


Рис. 22. Пластина пакета статора с нанесенными основными размерами и полюсными делениями (при четырех полюсах).

Шагом обмотки по пазам называется расстояние между активными сторонами катушки. Это расстояние измеряется в электрических градусах и определяется числом зубцов или числом пазов, расположенных между сторонами катушки. Результат измерения шага обмотки по пазам в электрических градусах будет правильным, если за ширину катушки считать расстояние между осевыми линиями (серединами) активных сторон катушки; если же ширину катушки считать по расстоянию между ее внутренними сторонами, то только подсчет числа зуб-

цов между сторонами катушки даст правильное число шага по пазам. Обычно шагом обмотки по пазам y называется число пазов, которое надо прибавить к номеру паза, в котором лежит первая сторона катушки, чтобы получить номер паза, занимаемого второй стороной катушки, или число зубцов, расположенных между сторонами катушки.

В рабочих чертежах и обмоточно-расчетных записках шаг обмотки по пазам обозначается двумя цифрами, показывающими, в какой паз должна быть уложена вторая сторона катушки, если первая сторона уложена в первый паз. Так, запись $y=1-7$ показывает, что шаг обмотки по пазам равен 6 и что если любой паз, в который вложена первая сторона катушки, назвать первым пазом, то вторая сторона катушки должна быть вложена в 7-й паз $(1+6)$.

Шаг обмотки может быть диаметральным, укороченным и — редко — удлиненным.

Диаметральным шагом называется такой шаг, при котором расстояние между серединами сторон катушки равно полюсному делению τ. В двухполюсных электродвигателях при шаге обмотки по пазам, равном полюсному делению, стороны катушки будут расположены по линии диаметра расточки статора; при большем числе полюсов стороны катушки будут расположены по линии хорды, однако и в этих случаях название «диаметральный шаг» сохраняется, если он взят равным полюсному делению.

Укороченным шагом обмотки по пазам называется шаг, меньший по числу пазов, чем диаметральный.

5. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА КОНСТРУИРОВАНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА

При конструировании обмоток статора следует придерживаться следующих основных правил.

Все три фазы обмотки должны иметь одинаковое количество витков, одинаковое число катушечных групп и катушек, одинаково соединенных и симметрично расположенных по окружности статора.

Расстояния между началами и концами фаз должны быть сдвинуты между собой на 120 *эл. град.*, или $^2/_3$ полюсного деления. Это требование диктуется условиями

симметрии обмотки и вытекает из того, что вращающееся магнитное поле, пройдя расстояние, соответствующее двойному полюсному делению 2τ, совершает путь равный 360 *эл. град.*, откуда 360 *эл. град.* $\alpha=2\tau$, а 120 *эл. град* $=\frac{1}{3}\cdot 2\tau$, или $\frac{2}{3}\tau$.

В зависимости от типа обмотки шаг по пазам должен быть диаметральным или с укорочением до 0,8 величины диаметрального. Шаг обмотки по пазам вычисляется, исходя из количества пазов статора z и числа полюсов электродвигателя $2p$. Например, если число пазов статора $z=24$, число $2p=4$, то диаметральный шаг обмотки по пазам равен:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{24}{4}=6 \text{ пазам,}$$

откуда стороны катушки должны быть уложены в 1-й и 7-й пазы. При укороченном шаге на один паз шаг обмотки по пазам уже будет равен 5 и стороны катушки должны быть уложены в 1-й и 6-й пазы.

Число катушек в катушечной группе нельзя брать произвольным. Если, например, в статоре двухполюсного электродвигателя имеется 12 пазов, то на один полюс приходится шесть пазов и в этих шести пазах должны разместиться стороны катушек всех трех фаз, создающих данный полюс. Поэтому при конструировании и составлении схем обмотки число пазов на полюс и фазу является характерной и решающей величиной.

В приведенном примере число пазов на полюс и фазу равно двум [(12 : 2) : 3=2] и обозначается индексом q.

Таким образом, для подсчета величины q применяется следующая формула

$$q=\frac{z}{2pm}, \tag{9}$$

где z — число пазов статора или фазного ротора;

$2p$ — число полюсов электродвигателя;

m — число фаз.

Катушечные группы фазы соединяются между собой в следующем порядке.

При числе катушечных групп в фазе, равном числу полюсов электродвигателя, они соединяются между со-

бой в такой последовательности: конец первой катушечной группы соединяется с концом второй катушечной группы, начало второй катушечной группы соединяется с началом третьей катушечной группы, конец третьей катушечной группы соединяется с концом четвертой кашечной группы и т. д., т. е. соединяются конец с концом, начало с началом. Такое соединение относится ко всем двухслойным обмоткам и к тем однослойным, у которых катушечные группы разделены на катушечные полу-

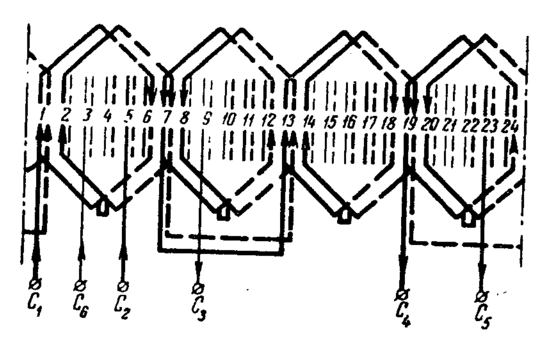


Рис. 23. Соединение катушечных групп в двухслойной обмотке.

группы, и поэтому число полугрупп в фазе этих обмоток равно числу полюсов (однослойные обмотки «вразвалку»).

Если число катушечных групп в фазе меньше числа полюсов электродвигателя, их соединения выполняются следующим образом: конец первой катушечной группы соединяют с началом второй катушечной группы, конец второй катушечной группы соединяют с началом третьей катушечной группы и т. д., т. е. соединяются конец с началом. За начало катушечных групп принято считать левые концы выводов катушечных групп по ходу намотки статора против часовой стрелки. На рис. 23 и 24 показан первый вид соединений катушечных групп, а на рис. 25 — второй вид соединений.

Активные и индуктивные сопротивлеия фаз и параллельных ветвей должны быть одинаковыми, поэтому во всех трех фазах и в параллельных ветвях должно быть одинаковое число равных по размеру катушек, одинако-

вое число эффективных витков и одинаковое сечение эффективного провода.

При расчетах обмоток электрических машин вычисляется необходимое число эффективных витков в фазе, а потом число эффективных витков или эффективных проводов в пазу. Если обмотка выполнена в несколько параллельных проводов, например в три, то все три эле-

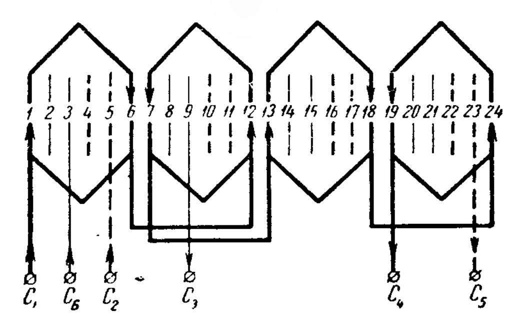


Рис. 24. Соединение катушечных групп в однослойной секционной обмотке „вразвалку“.

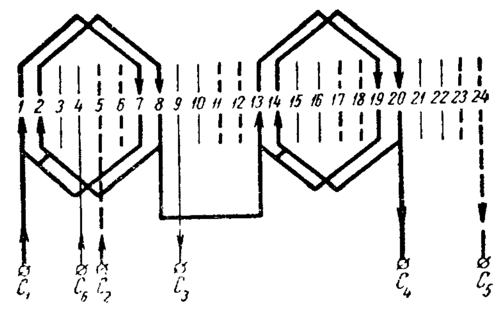


Рис. 25. Соединение катушечных групп в однослойной секционной обмотке.

ментарных витка будут составлять один эффективный виток. При выполнении обмотки с несколькими параллельными ветвями число одинарных, двойных или тройных витков в фазе должно быть соответственно увеличено, но число эффективных витков в фазе, как и число эффективных проводов в пазу, от этого не должно меняться.

В целях большей равномерности магнитного потока в воздушном зазоре параллельные ветви в обмотках статора асинхронных электродвигателей составляются из расположенных подряд катушечных групп.

Параллельные ветви следует выполнять так, чтобы направление токов в проводах катушечных групп было таким же, каким оно было в обмотке без параллельных

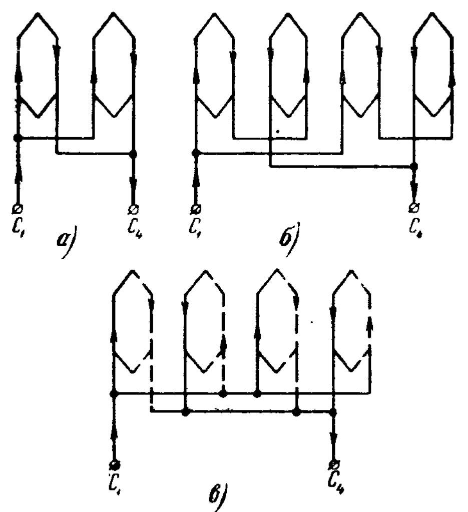


Рис. 26. Соедииение катушечных групп в фазе в параллельной ветви четырехполюсного электродвигателя.

ветвей. На рис. 26 показаны соединения в параллельные ветви катушечных групп фазы электродвигателя с $2p=4$ при различных видах обмотки статора.

При замене типа обмотки, связанной с изменением шага по пазам, например при переходе с однослойной обмотки на двухслойную с укороченным шагом или наоборот, следует изменять и число эффективных витков в фазе.

При уменьшении шага следует увеличивать число эффективных витков, а значит, и число эффективных проводов в пазу, а при увеличении шага их уменьшать, что объясняется тем, что при укороченном шаге э. д. с. катушки меньше э. д. с. катушки с диаметральным ша-

гом, что компенсируется увеличением числа витков в катушке.

Отношение э. д. с. катушки при укороченном шаге к э. д. с. катушки с тем же числом витков при диаметральном шаге называют обмоточным коэффициентом укорочения.

Так как на величину э. д. с. фазы влияет также число катушек в катушечной группе (э. д. с. катушечной группы меньше э. д. с. одной катушки с тем же числом витков), при уточнении числа витков в фазе обмотки в связи с изменением шага по пазам одновременно следует учитывать и это положение, вводя дополнительно так называемый коэффициент распределения обмотки. При $q=1$ коэффицинт распределения равен единице, при $q=2$ коэффициент распределения обмотки равен 0,966 и т. д. Для удобства такого вычисления оба эти коэффициента сводят в один, который называется «обмоточный коэффициент обмотки». В табл. 2 даны значения обмоточного коэффициента k_w в зависимости от числа катушек в катушечной группе и укорочения шага обмотки. Величину укорочения шага обмотки вычисляют по формуле

$$\beta_у = \frac{y_{укороч}}{y_{диаметр}} .$$

Таблица 2

Значение обмоточных коэффициентов k_w трехфазной обмотки

Число катушек в катушечной группе	Укорочение шага обмотки в долях единицы								
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809
2	0,906	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,777
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775
5—7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773

При промежуточных значениях укорочения шага обмотки $\beta_у$ величину обмоточного коэффициента k_w определяют следующим образом.

Если обмотка с укорочением шага $\beta_у=0{,}83$ и числом катушек в катушечной группе $q=3$, тогда: по табл. 2 находят значения обмоточного коэффициента для расположенных подряд значений укорочения шага обмотки при $q=3$:

при $\beta_{у1}=0{,}85$ $k_{w1}=0{,}933$;
при $\beta_{у2}=0{,}80$ $k_{w1}=0{,}913$.

Вычисляют, на какую величину уменьшается обмоточный коэффициент при уменьшении укорочения шага обмотки на одну сотую доли единицы:

$$\frac{k_{w1}-k_{w2}}{85-80}=\frac{0{,}933-0{,}913}{5}=\frac{0{,}020}{5}=0{,}004.$$

Вычисляют, на какую величину уменьшится обмоточный коэффициент при $\beta_у=0{,}83$ по сравнению с обмоточным коэффициентом при $\beta_у=0{,}85$.

$$0{,}004\,(85-83)=0{,}004\cdot 2=0{,}008.$$

Вычисляют обмоточный коэффициент для заданной обмотки:

$$k_w=k_{w1}-0{,}008=0{,}933-0{,}008=0{,}925.$$

6. ВИДЫ ОБМОТОК

Существует много признаков, по которым определяется классификация обмоток, и поэтому одним и тем же обмоткам часто даются различные наименования. Наиболее распространенные типы обмоток следующие.

По способу заполнения пазов все обмотки делятся на однослойные и двухслойные. В однослойных обмотках сторона катушки заполняет весь паз, а в двухслойных — сторона катушки заполняет половину паза, а другую половину заполняет сторона другой катушки.

Число катушек в однослойной обмотке равно половине числа пазов, так как одна катушка занимает два паза, а в двухслойной число катушек равно числу пазов, так как каждая катушка одной стороной занимает половину паза, а другой стороной—половину другого паза.

По числу фаз обмотки делятся на однофазные и многофазные. Из многофазных обмоток практический интерес представляют трехфазные.

По виду витков и катушек обмотки делятся на волновые и петлевые. Волновые обмотки роторов называются и стержневыми, так как элементом обмотки является полувиток, состоящий из стержня. Все остальные обмотки статоров и роторов асинхронных электродвигателей являются петлевыми. Если катушки имеют разные шаги, где одна катушка охватывает другую, то такие обмотки можно называть обмотками с концентрическими катушечными группами. Однако многие их называют «катушечными», «катушечно-концентрическими» или «концентрическими».

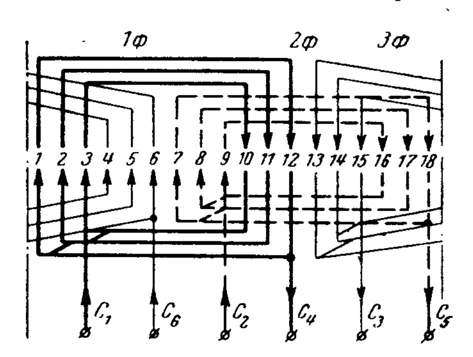


Рис. 27. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки. $z = 18$; $2p = 2$; $q = 3$; $y_1 = 7$; $y_2 = 9$; $y_3 = 11$.

На рис. 27 изображена однослойная катушечная (концентрическая) обмотка двухполюсного электродвигателя, статор которого имеет 18 пазов. Число катушек в катушечной группе равно $q=3$ и число катушечных групп в обмотке тоже равно трем, так как в однослойных обмотках число катушечных групп равно числу фаз, помноженному на число пар полюсов, число катушечных групп равно будет $mp=3p$, где p — число пар полюсов, а $2p$ — число полюсов.

Шаг обмотки по пазам в катушках катушечной группы этой обмотки, как и во всех катушечных (концентрических) обмотках, разный:

$$y_1 = 7;\ y_2 = 9;\ y_3 = 11,$$

а диаметральный или средний шаг y при $z=18$ и $2p=2$ равен $z:2p=18:2=9$. Правильность принятых шагов по пазам катушек этого вида обмоток проверяется следующим методом. Шаги всех катушек катушечной группы складываются и полученное число делится на число катушек в катушечной группе, а результат должен быть равен величине диаметрального шага:

$$y_{\text{ср}}=(y_1+y_2+y_3):3=(7+9+11):3=27:3=9.$$

В данной обмотке имеется одна катушка с несимметричными лобовыми частями, которые бывают в катушеч-

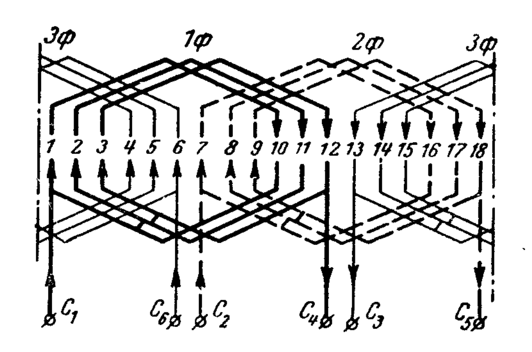


Рис. 28. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=18$; $2p=2$; $q=3$; $y=9$.

ных (концентрических) обмотках, с нечетным числом пар полюсов.

Если катушки катушечной группы имеют одинаковый шаг и одинаковые размеры, они иногда называются однослойными шаблонными обмотками.

На рис. 28 изображена схема однослойной секционной обмотки двухполюсного электродвигателя. Статор имеет 18 пазов. Число катушек в катушечной группе — 3, число катушечных групп в фазе — 1, шаг по пазам $y=9$ (1—10), т. е. обмотка выполнена с диаметральным шагом.

Разновидностью однослойных катушечных (концентрических) обмоток и однослойных секционных обмоток

являются однослойные катушечные (концентрические) обмотки «вразвалку» и однослойные секционные обмотки «вразвалку», у которых фазы обмотки состоят из катушечных полугрупп, соединенных так, чтобы в образовании каждого полюса участвовали стороны катушечных групп всех трех фаз.

На рис. 29 дана схема однослойной секционной обмотки «вразвалку» двухполюсного электродвигателя. Статор имеет 18 пазов, число пазов на полюс и фазу

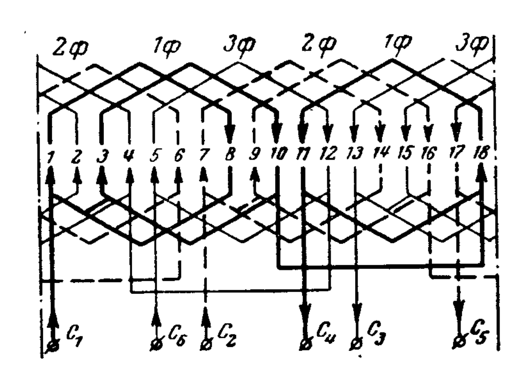


Рис. 29. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку".

$z = 18$; $2p = 2$; $q = 3$; $y_1 = 7$; $y_2 = 8$

$q=3$, число катушек в фазе *3*, число катушек в обмотке *9*. Каждая катушечная группа, состоящая из трех катушек, разделена на две катушечные полугруппы; одна имеет две катушки, другая — одну катушку. Соединены между собой катушечные полугруппы так, чтобы в образовании полюса участвовали все три стороны катушечной группы каждой фазы. Данная обмотка имеет укороченный и разный шаг по пазам: $y_1=7$; $y_2=8$; диаметральный шаг такой обмотки был бы $y=9$. В связи с укорочением шага по пазам расход меди на лобовые части обмотки меньше, чем в однослойной секционной, показанной на рис. 28, для такого же электродвигателя. Разные шаги по пазам в данной обмотке и других аналогичных не меняют свойств обмотки.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ВЫБОР ВИДА ОБМОТКИ. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ПРИ НАМОТКЕ

7. ВЫБОР ВИДА ОБМОТКИ

При ремонте электродвигателей следует стремиться к улучшению их электрических свойств и технических данных по сравнению с данными завода-изготовителя. В большинстве случаев возможность к этому имеется, особенно при ремонте электродвигателей старых типов. Применение новых обмоточных проводов с более теплостойкой и более тонкой изоляцией и новых видов электроизоляционных материалов дает возможность повысить номинальную мощность машины даже в электродвигателях единой серии или же при сохранении прежней мощности повысить их надежность в работе.

При выборе вида обмотки рекомендуется руководствоваться следующими соображениями.

Двухслойные обмотки с укороченным шагом имеют ряд преимуществ по сравнению с однослойными обмотками. В двухслойных обмотках расход обмоточных проводов на 10—15% меньше, чем в однослойных, за счет меньшей длины лобовых частей, а при укорочении, равном 0,8 полюсного деления, форма кривой поля и э. д. с. приближаются к синусоиде, что улучшает электрические свойства электродвигателя, а также к. п. д. и $\cos\varphi$ в связи с меньшим активным и индуктивным сопротивлением обмотки. Двухслойные обмотки легко выполнимы при дробном q.

Значительное распространение имеют и однослойные обмотки, особенно в электродвигателях малых мощностей; объясняется это тем, что в однослойных обмотках коэффициент заполнения паза медью выше, чем в двухслойных, так как в двухслойных обмотках между нижними и верхними сторонами катушек прокладываются прокладки из электрокартона. Кроме того, при переходе на обмотку с укороченным шагом необходимо увеличивать число эффективных проводов в пазу, чтобы не допустить увеличения тока холостого хода, а все вместе

может даже снизить мощность электродвигателя малых габаритов при замене однослойной обмотки двухслойной. Затраты труда при выполнении однослойной обмотки также ниже, чем при двухслойной обмотке.

При выборе вида обмотки определенную роль играет наличие требуемого сечения обмоточного провода. При больших диаметрах провода легче выполнить обмотку двухслойной, так как толщина катушки при этом вдвое меньше, чем в однослойной, что облегчает процесс гибки лобовых частей. При малых диаметрах проводов и необходимости выполнять обмотку в два или три параллельных провода выгоднее применить однослойную обмотку, позволяющую иметь более высокий коэффициент заполнения паза медью.

Вопрос выбора типа обмотки иногда решается, исходя из конструктивных особенностей данного электродвигателя. При малой высоте спинки статора и небольшом пространстве между подшипниковым щитом и торцом сердечника статора обмотку следует выполнять двухслойной, у которой лобовые части равномерно распределяются по окружности статора, почему и имеют меньший вылет.

Что касается выбора однослойной обмотки, то с точки зрения электрических свойств электродвигателя катушечная (концентрическая) обмотка и однослойная секционная с диаметральным шагом равнозначны и их изготовление производится, за редким исключением, с применением шаблонов. Однако выполнение однослойной секционной обмотки проще и легче, поэтому в ремонтной практике катушечные (концентрические) обмотки реже встречаются. Катушечная (концентрическая) обмотка в основном применяется при намотке роторов электродвигателей небольших мощностей, а также при намотке статоров и роторов, имеющих полузакрытые пазы с небольшой величиной пазового шлица, через который провод не проходит. В таких случаях процесс намотки производится в протяжку.

Однослойные секционные обмотки «вразвалку», даже при укороченном шаге, обладают такими же электрическими и магнитными свойствами, как и однослойные секционные обмотки, выполненные без укорочения шага. Преимущество таких обмоток заключается в экономии меди и более равномерном распределении лобовых ча-

стей катушек по окружности статора. То же самое можно сказать и в отношении катушечных (концентрических) обмоток «вразвалку». Особое место занимают те обмотки, у которых, кроме укорочения шага, стороны катушек в катушечной группе не расположены в рядом лежащих пазах, а вперемежку со сторонами катушек другой фазы (рис. 30). При таком расположении в пазах сторон катушечных групп укорочение шага дает не только экономию меди, но и улучшение электрических и магнитных свойств электродвигателя. Следует заметить,

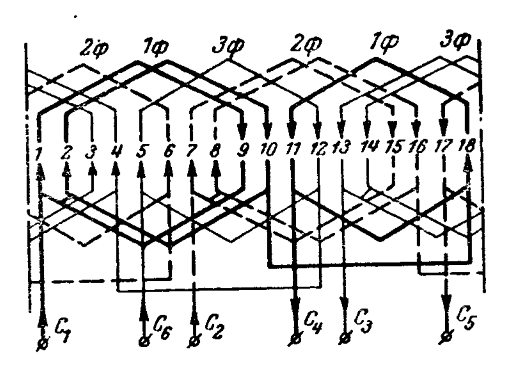


Рис. 30. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку".

$z = 18$; $2p = 2$; $q = 3$; $y = 7$.

что для этого необходимо еще, чтобы величина q была четным числом, чего нет в обмотке, показанной на рис. 30, почему и эти обмотки при некоторых положительных сторонах дают несинусоидальное вращающееся магнитное поле.

При переходе на обмотку с укороченным шагом или наоборот следует откорректировать число эффективных витков в фазе или число эффективных проводов в пазу соответственно с изменившимся обмоточным коэффициентом.

Пример. У однослойной секционной обмотки статора электродвигателя с числом пазов $z=36$, числом полюсов $2p=4$, $q=3$, $y=9$, с числом эффективных проводов в пазу, равным 22, требуется определить число эффективных проводов в пазу при переходе на двухслойную обмотку с шагом $y=7$.

По табл. 2 определяется обмоточный коэффициент однослойной обмотки с диаметральным шагом $\beta_y'=1$ и $q=3$:

$$k_w' = 0{,}96.$$

Определяется величина укорочения шага двухслойной обмотки:

$$\beta_y'' = \frac{7}{9} = 0{,}78.$$

Пользуясь табл. 2, определяется обмоточный коэффициент двухслойиой обмотки, имеющей укорочение шага $\beta_y=0{,}78$ при $q=3$:

$$k_w'' = k_{w1} - \left[\left(\frac{k_{w1}-k_{w2}}{80-75}\right)\cdot 2\right] = 0{,}913 - \left[\left(\frac{0{,}913-0{,}887}{5}\right)\cdot 2\right] =$$

$$= 0{,}913 - \frac{0{,}026}{5}\cdot 2 = 0{,}913 - 0{,}010 = 0{,}903.$$

Производится пересчет числа эффективных проводов в пазу:

$$N_п'' = N_п' \frac{k_w'}{k_w''} = 22\cdot\frac{0{,}96}{0{,}903} \approx 24.$$

Пример. Двухслойиая обмотка статора электродвигателя имела число пазов $z=36$, число полюсов $2p=2$, $q=6$, $y=12$, число эффективных проводов в пазу 18. Требуется определить число эффективных проводов в пазу при переходе на одиослойную секционную обмотку «вразвалку» с шагом $y=15$.

Определяется величина укорочения шага двухслойной обмотки:

$$\beta_y'' = \frac{12}{18} \approx 0{,}67 \text{ (здесь 18 — диаметральиый шаг).}$$

По табл. 2 определяется обмоточный коэффициент двухслойной обмотки, у которой укорочение $\beta_y'' = 0{,}67$ при $q = 6$, с примеиением перерасчета:

$$k_w'' = 0{,}83.$$

Определяется величина укорочения шага однослойной обмотки:

$$\beta_y' = \frac{15}{18} = 0{,}83.$$

По табл. 2 определяется обмоточный коэффициеит однослойчой обмотки, у которой укорочеиие шага $\beta_y'=0{,}83$ при $q=6$, с примеиеиием перерасчета:

$$k_w' = 0{,}92.$$

Производится пересчет числа эффективиых проводов в пазу:

$$N_п' = N_п'' \frac{k_w''}{k_w'} = 18\cdot\frac{0{,}83}{0{,}92} \approx 16.$$

8. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Наиболее распространенным способом изображения схем обмоток является развертка окружности статора или ротора на плоскость с изображением пазов вертикальными линиями с их нумерацией порядковыми числами от единицы до z. В однослойных обмотках паз обозначается одной сплошной линией, что означает и вложенную в паз сторону катушки. В двуйслойных обмотках паз обозначается двумя рядом расположенными линиями. Левая линия обычно делается сплошной и обо-

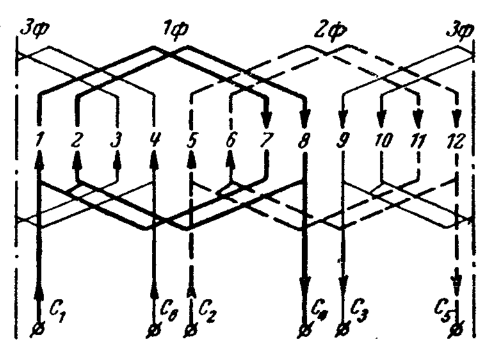


Рис. 31. Схема однослойной секционной обмотки $z=12$; $2p=2$; $q=2$; $y=6$.

значает одну сторону катушки верхней половины паза, а правая — пунктирной и обозначает сторону катушки, расположенную в нижней половине паза.

Исходными данными для составления схемы обмотки статора являются: число пазов статора z, число полюсов электродвигателя $2p$, число фаз m, число параллельных ветвей a, число катушек в обмотке n_k, число катушечных групп в обмотке $n_{к.г}$, число пазов между сторонами катушки $n_п$.

Порядок составления схем для различных видов обмоток статора дается ниже.

а) Однослойные секционные трехфазные обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя, у которого:

$$z=12;\quad 2p=2;\quad a=1 \text{ (рис. 31)}.$$

Определяется число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{12}{2\cdot 3}=2.$$

Следовательно, катушечная группа состоит из двух катушек.

Определяется шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{12}{2}=6.$$

Обмотку выполняют с диаметральным шагом, где левую сторону первой катушки располагают в 1-м пазу, а правую — в 7-м пазу; левую сторону второй катушки располагают во 2-м пазу, правую — в 8-м пазу, а обе катушки катушечной группы соединяют коротенькой линией, показывающей последовательность соединения катушек.

Подсчитывают число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{к}=\frac{z}{2}=\frac{12}{2}=6;$$

$$n_{к.г}=\frac{n_{к}}{q}=\frac{6}{2}=3,$$

откуда следует, что на одну фазу приходится по одиой катушечиой группе.

Определяют расстояние между началами фаз, т. е. $^2/_3\tau$:

$$\frac{2}{3}\tau=\frac{2}{3}\cdot\frac{z}{2p}=\frac{2\cdot 12}{3\cdot 2}=4.$$

Это означает, что если начало первой фазы расположить в 1-м пазу обмотки, то начало второй фазы должно находиться в 5-м пазу и начало третьей фазы в 9-м пазу.

Катушечную группу второй фазы укладывают в пазы: левые стороны катушек —в 5-й и 6-й пазы, а правые стороны — в 11-й и 12-й. Катушечную группу третьей фазы укладывают соответствеино в 9-й и 10-й, 3-й и 4-й пазы. Здесь 3-й и 4-й пазы получились методом прибавления к пазу 9 шага по пазам 6 (6+9=15) и вычли z, равное 12, откуда 15—12=3, а к пазу 10 прибавили шаг 6 и вычли 12 и получили 4-й паз. Концы фаз обозначаются по ГОСТ: начало 1-й фазы — C_1, конец первой фазы — C_4, начало 2-й фазы — C_2, конец второй фазы — C_5, начало 3-й фазы — C_3, конец 3-й фазы — C_6 и проверяют расстояние между концами фаз, которое тоже должно равняться $^2/_3\tau$.

Если ток входит в обмотку из начала 1-й и 2-й фазы (иа схеме стрелки направлены вверх), а выходит из обмотки через начало 3-й фазы (на схеме стрелки направлены вииз), а схема правильно составлена, то после наиесения стрелок, показывающих иаправление тока в проводах, вся обмотка разделится на две части (зоиы), имеющие противоположную полярность и состоящие каждая из шести катушечных сторон ($3q$), принадлежащих катушкам всех трех фаз.

Пример. Составить схему трехфазной обмотки статора электродвигателя, у которого: $z=12$; $2p=4$; $a=1$ (рис. 32).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{12}{4 \cdot 3} = 1,$$

т. е. катушечная группа состоит из одной катушки.

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{z}{2p} = \frac{12}{4} = 3.$$

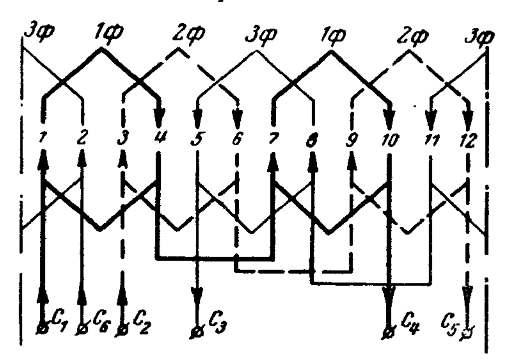


Рис. 32. Схема однослойной секционной обмотки.
$z = 12$; $2p = 4$; $q = 1$; $y = 3$.

Подсчитывают число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_к = \frac{z}{2} = \frac{12}{2} = 6;$$

$$n_{к.г} = \frac{n_к}{q} = \frac{6}{1} = 6.$$

Следовательно, на каждую фазу приходятся две катушечные группы, по одной катушке в каждой.

Размещают в пазах первую катушечную группу первой фазы: в 1-м пазу — левую сторону катушки, а в 4-м пазу — правую сторону катушки.

В однослойных секционных обмотках катушечные группы одной фазы отстоят друг от друга на 2 диаметральных шага, поэтому вторая катушечная группа будет занимать 7-й и 10-й пазы.

Определяют расстояние между началами фаз: так как

$$2/3\,\tau = \frac{2z}{3 \cdot 2p} = \frac{z}{3p},$$

а

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{z}{2p \cdot 3} = \frac{z}{6p},$$

то

$$2/3\tau = 2q,$$

где $2q = 2 \cdot 1 = 2$.

Исходя из этого, начало 2-й фазы расположится в 3-м пазу, а начало 3-й фазы — в 5-м пазу.

Катушечные группы 2-й и 3-й фаз расположатся следующим образом: первая катушечная группа 2-й фазы будет занимать 3-й и 6-й пазы, а вторая должна быть расположена от нее на 2 диаметральных шага, или занимать 9-й и 12-й пазы.

Первая катушечная группа 3-й фазы разместится в 5-м и 8-м пазах, а вторая разместится в 11-м и 2-м пазах; затем соединяют

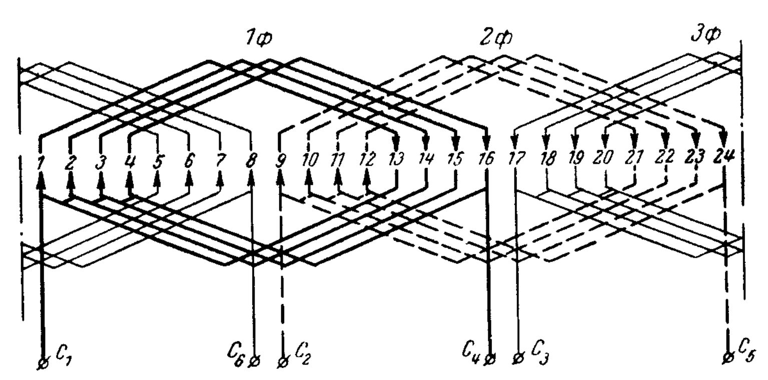


Рис. 33 Схема однослойной секционной обмотки.
$z = 24$; $2p = 2$; $q = 4$; $y = 12$.

катушечные группы, где конец первой катушечной группы соединяется с началом второй в каждой фазе.

Выводы, показывающие начала и концы фаз, нумеруются по ГОСТ и по ним проверяют расстояние между концами фаз, которое должно равняться $2q$, а стрелками обозначают направление тока в проводах, проверив при этом, разделена ли обмотка на четыре зоны, представляющие собой четыре полюса. После проверки каждая катушечная группа отмечается соответствующим номером фазы.

На рис. 33 показана схема обмотки статора со следующими данными: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=12$. Порядок составления схемы такой же, как в примере 1. Расстояние между началами фаз равно $2q=2 \cdot 4=8$, также и между концами фаз. Шаг обмотки по пазам диаметральный. В образовании полюса участвуют стороны катушечных групп всех трех фаз.

Пример. Составить схему трехфазной обмотки статора.

Дано: $z=36$; $2p=4$; $a=2$ (рис. 34).

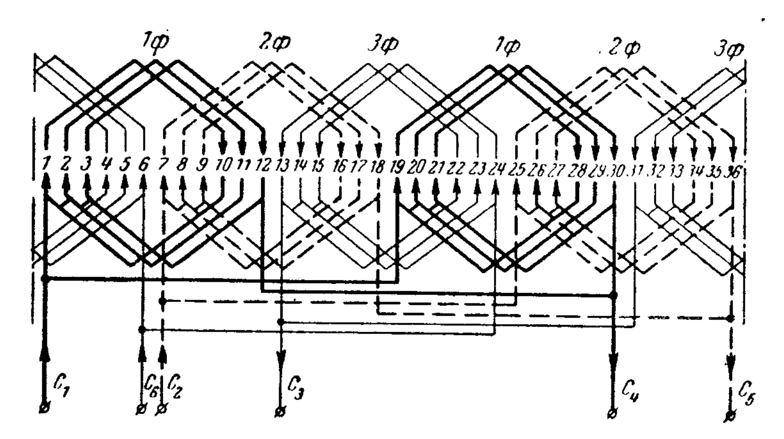


Рис. 34. Схема однослойной секционной обмотки.
$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y=9$; $a=2$.

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot 3}=3.$$

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{36}{4}=9.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{\text{к}}=\frac{z}{2}=\frac{36}{2}=18;$$

$$n_{\text{к.г}}=\frac{n_{\text{к}}}{q}=\frac{18}{3}=6.$$

Таким образом, на фазу приходится 6 : 3=2 катушечные группы, где каждая катушечная группа состоит из трех катушек.

Размещают в пазах 1-ю катушечную группу 1-й фазы, где левая сторона ее займет 1-й, 2-й и 3-й пазы, а правая сторона — 10-й, 11-й и 12-й пазы.

Начало 2-й катушечной группы 1-й фазы расположится на 2 диаметральиых шага от иачала 1-й катушечной группы, т. е. в 19-м пазу; конец расположится в 28-м пазу; остальные две катушки левыми сторонами займут 20-й и 21-й пазы, а правыми — 29-й и 30-й пазы.

Начало 2-й фазы расположится от начала 1-й фазы на $2q=2\cdot 3=6$, т. е. в 7-м пазу, начало 3-й фазы — в 13-м пазу. Левые стороны 1-й катушечной группы 2-й фазы займут 7-й, 8-й и 9-й пазы, правые — 16-й, 17-й и 18-й пазы. Левые стороны 1-й катушечной

группы 3-й фазы расположатся в 13-м, 14-м и 15-м пазах, правые — в 22-м, 23-м и 24-м пазах.

Вторая катушечная группа 2-й фазы расположится на 2 диаметральных шага от 1-й катушечной группы своей фазы; левая сторона ее займет 25-й, 26-й и 27-й пазы, а правая — 34-й, 35-й и 36-й пазы. Вторая катушечная группа 3-й фазы левой стороной займет 31-й, 32-й и 33-й пазы, а правой стороной — 4-й, 5-й и 6-й пазы.

Соединяют между собой катушки в каждой катушечной группе и фиксируют номера фаз на катушечных группах.

Соединяют катушечные группы каждой фазы в две параллельные ветви, где на одну параллельную ветвь приходится по одной катушечной группе. Начала 1-й и 2-й катушечных групп соединя-

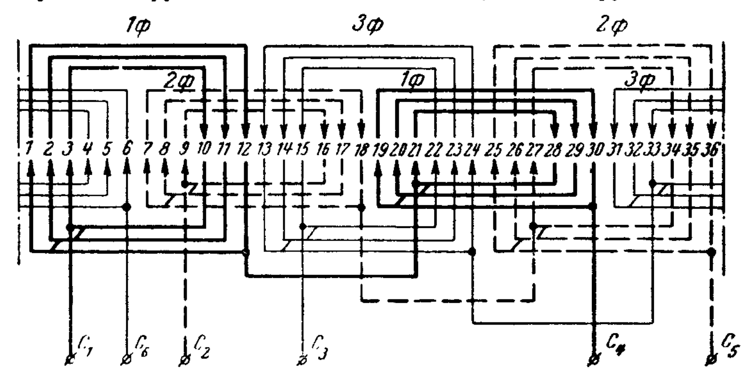


Рис. 35. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки. $z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $y_1 = 7$; $y_2 = 9$; $y_3 = 11$.

ют вместе, а общий вывод будет началом фазы. Концы 1-й и 2-й катушечных групп также соединяют вместе, и общий вывод будет концом фазы.

Аналогично производят соединение катушечных групп в две параллельные ветви во второй и третьей фазах и буквенными индексами обозначают начала и концы фаз.

Стрелками обозначают направление токов в проводах и параллельных ветвях, проверив правильность расположения полюсов в обмотке. Каждый полюс должен быть образован сторонами катушечных групп всех трех фаз, а чередование полюсов должно быть С—Ю—С—Ю или Ю—С—Ю—С в зависимости от того, какое направление стрелок было принято за северный и южный полюсы.

б) Однослойные катушечные (концентрические) обмотки с целым q

Пример. Дано: $z=36$; $2p=4$; $a=1$. Требуется составить схему трехфазной обмотки (рис. 35).

Определяют число пазов, приходящееся на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3.$$

Определяют средний шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_к = \frac{z}{2} = \frac{36}{2} = 18;$$

$$n_{к.г} = \frac{n_к}{q} = \frac{18}{3} = 6.$$

Таким образом, в каждой фазе будет по две катушечные группы, а в каждой катушечной группе — по три катушки разной ширины (обмотка концентрическая).

Берется катушечная группа, где левую сторону самой узкой катушки помещают в 3-й паз, а правую — в паз, расположенный от 3-го паза на расстоянии $2q$, т. е. в 10-й паз; тогда следующая за нею в порядке намотки вторая катушка должна быть помещена во 2-й и 11-й пазы, а третья катушка в 1-й и 12-й пазы; при этом средний шаг получится равным

$$y_{ср} = (7 + 9 + 11) : 3 = 9.$$

Вторую катушечную группу первой фазы укладывают так, чтобы левая сторона самой узкой катушки разместилась в пазу, отстоящем от начала 1-й катушечной группы на 2 диаметральных шага, т. е. в 21-м пазу. Вторая сторона этой катушки разместится через $2q$ пазов, т. е. в 28-м пазу; левые стороны остальных двух катушек займут пазы 20-й и 19-й, а правые стороны — 29-й и 30-й.

Начало 2-й и 3-й фазы располагают друг от друга на расстоянии $2q$, т. е. на 6 пазов, руководствуясь при этом теми же правилами, что и при укладке 1-й фазы.

Наносят соединительные линии между катушками катушечных групп во всех трех фазах и соединяют конец первой катушечной группы с началом второй катушечной группы и буквенными индексами обозначают начала и концы фаз, а направление токов в проводах обмотки — стрелками, одновременно проверив правильность чередования полюсов.

в) Однослойные секционные трехфазные обмотки «вразвалку» с целым q

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя.

Дано: $z = 12$; $2p = 2$; $a = 1$ (рис. 36).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2.$$

Определяют число катушек и катушечных полугрупп в обмотке

$$n_{к} = \frac{z}{2} = \frac{12}{2} = 6;$$

$$n_{к.г} = \frac{n_{к}}{q} = \frac{6}{2} = 3$$

На каждую фазу приходится по одной катушечной группе, состоящей из двух катушечных подгрупп, где последняя состоит из одной катушки.

Определяют шаг обмотки по пазам, проверив приемлемость для данной обмотки расстояния между сторонами катушек, равного

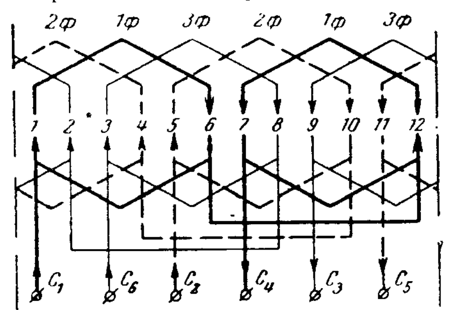


Рис. 36. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку".
$z = 12$; $2p = 2$; $q = 2$; $y = 5$.

$2q = 2 \cdot 2 = 4$; тогда стороны первой катушки 1-й фазы займут 1-й и 6-й пазы. Для проверки правильности принятого шага можно пользоваться практическим способом.

Наносят на бумагу ряд вертикальных линий, обозначающих пазы, и проставляют номера пазов от единицы до числа, превышающего величину шага обмотки на несколько пазов. Размещают катушечную полугруппу в пазы согласно подсчитанному или заданному шагу, а в свободные пазы между сторонами катушечной полугруппы размещают катушечные полугруппы других фаз так, чтобы лобовые части рядом лежащих катушечных полугрупп выходили в противоположные стороны. Поскольку лобовые части левой стороны катушечной полугруппы 1-й фазы направлены вправо, лобовые части рядом лежащей катушечной полугруппы другой фазы должны быть направлены влево, а следующей катушечной полугруппы — вправо и т. д. При правильном выборе шага должна получиться полная симметрия в расположении лобовых частей, а все пазы между сторонами катушечной полугруппы, принятой за первую, должны быть заняты катушечными полугруппами других фаз (рис. 37).

Из такого построения видно, что шаг 1—6 определен правильно.

Вторую катушечную полугруппу 1-й фазы располагают так, чтобы левая ее сторона разместилась на расстоянии диаметрального

шага от начала 1-й катушечной полугруппы, а правая в паз по шагу обмотки, т. е. в пазы 7-й и 12-й. Вычертив эту катушечиую полугруппу, ее левая сторона расположится рядом с правой стороиой 1-й катушечиой полугруппы. Такое расположение является общим для всех обмоток «вразвалку», чем можно воспользоваться при составлении схем обмоток.

Соединяют конец 1-й катушечной полугруппы с концом 2-й катушечиой полугруппы.

Определяют иачала 2-й и 3-й фаз. Все начала фаз и в обмотке этого вида будут располагаться друг от друга на расстоянии $2q$.

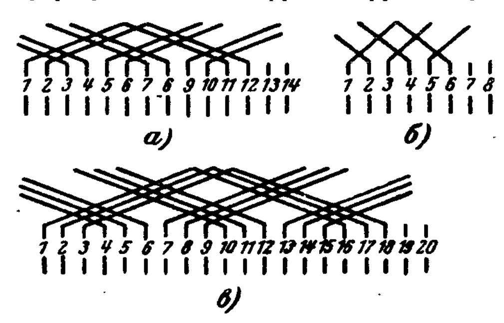


Рис. 37. Практический способ проверкн правильности взятого шага по пазам в однослойной секционной обмотке „вразвалку".

Если начало 1-й фазы расположить в 1-м пазу, то начало 2-й фазы будет выходить из 5-го паза, а начало 3-й фазы — из 9-го паза.

Размещают катушечиые полугруппы 2-й и 3-й фаз в соответствующих пазах аналогично размещеиию 1-й фазы и соедиияют их в фазах.

На катушечных полугруппах фиксируют номера фаз и буквами обозначают выводные концы, указав стрелками направления токов в проводах, при одновремеиной проверке правильности составлениой схемы по полярности полюсов.

Пример. Составить схему одиослойной секционной обмотки «вразвалку».

Дано: $z = 36$; $2p = 4$; $a = 1$ (рис. 38).

Определяют число пазов на полюс и фазу;

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3.$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n_{\text{к}} = \frac{z}{2} = \frac{36}{2} = 18;$$

$$n_{\text{к.г}} = \frac{18}{3} = 6.$$

В каждой фазе катушечных групп будет 6 : 3=2.

Определяют число катушек в катушечной полугруппе.

Так как q — нечетное число, катушечные полугруппы должны состоять из различного количества катушек: первая полугруппа каждой катушечной группы должна иметь $(q+1):2$, а вторая полугруппа $(q-1):2$ катушек.

Подсчитывают число катушек в каждой полугруппе при $q=3$. В первой полугруппе $(3+1):2=2$ катушки, а во второй $(3-1):2=1$ катушка. Таким образом, в фазе будут полугруппы с двумя катушками 2 и с одной катушкой 2.

Первую катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек, располагают в пазах, где 1-й и 2-й пазы займет левая сторона, а правая сторона через $2q$ или 6 пазов займет 9-й и 10-й пазы.

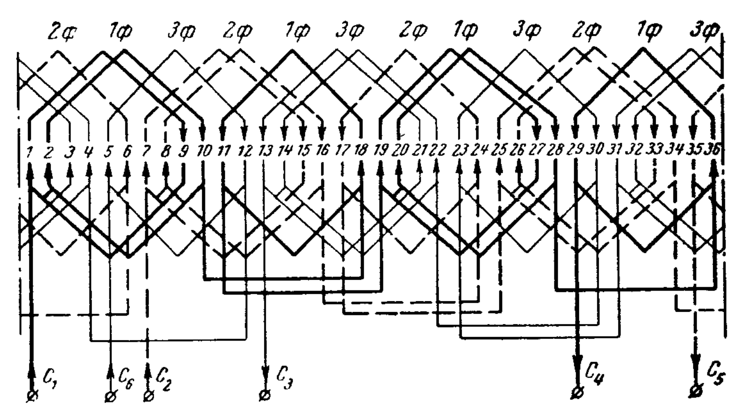


Рис. 38. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку".
$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$.

Следующая полугруппа первой катушечной группы, состоящая из одной катушки, левой стороной займет 11-й паз, а правая сторона через $2q$ займет 18-й паз.

Вторая катушечная группа займет: полугруппа с двумя катушками левой стороной — 19-й и 20-й пазы, а правой — 27-й и 28-й пазы и полугруппа с одной катушкой левой стороной — 29-й, а правой — 36-й паз. Соединение полугрупп производят по правилу «конец с концом, начало с началом», предварительно соединив последовательно катушки в полугруппах.

Начала фаз располагают через $2q$, равном шести пазам: в 7-м пазу — начало 2-й фазы, в 13-м пазу — начало 3-й фазы, а соединения производят, как в 1-й фазе.

Обозначим цифрами номера фаз, буквами — начала и концы фаз, разметим стрелками направление тока в проводах катушек и проверим полярность и чередование полюсов.

Рассматривая составленную схему, мы увидим, что шаг по пазам обмотка имеет неодинаковый: в одних катушках $y=7$, в других $y=8$, однако принцип построения схемы от этого не нарушен.

г) Двухслойные трехфазные обмотки с целым q

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя (рис. 39).

Дано: $z = 12$; $2p = 2$; $a = 1$.

Определяем число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2.$$

Определяем диаметральный шаг:

$$y_д = \frac{z}{2p} = \frac{12}{2} = 6.$$

Берем укороченный шаг $y_у = 0{,}8 y_д = 0{,}8 \cdot 6 \approx 5$.

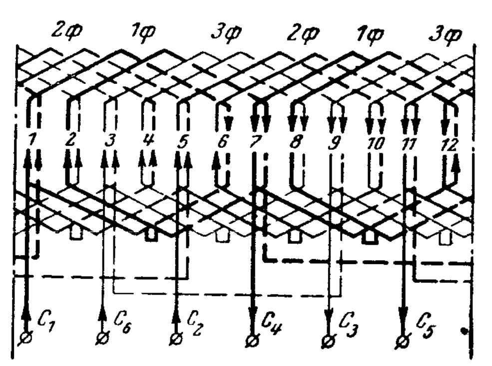


Рис. 39. Схема двухслойной обмотки.
$z = 12$; $2p = 2$; $q = 2$; $y = 5$.

Определяем число катушек и число катушечных групп в обмотке:

$$n_к = z = 12;$$

$$n_{к.г} = \frac{n_к}{q} = \frac{12}{2} = 6.$$

На фазу приходятся две катушечные группы, в катушечной группе две катушки.

Размещаем левую сторону первой катушечной группы в верхнюю часть 1-го и 2-го пазов, правую сторону — в нижнюю часть 6-го и 7-го пазов. Начало второй катушечной группы 1-й фазы располагаем от начала первой катушечной группы на расстоянии диаметрального шага, т. е. в 7-м пазу. Вторая катушечная группа займет пазы: левой стороной — верхнюю часть 7-го и 8-го пазов, правой стороной — нижнюю часть 12-го и 1-го пазов.

Соединяем между собой катушки последовательно, катушечные группы — по правилу: «конец первой катушечной группы с концом второй катушечной группы, начало второй катушечной группы с началом третьей катушечной группы».

Размещаем начала 2-й и 3-й фаз: начало 2-й фазы должно находиться на расстоянии $2q$ от начала 1-й фазы и занимать 5-й паз; начало 3-й фазы должно отстоять от начала 2-й фазы также на $2q$ и занимать 9-й паз. Размещаем катушечные группы 2-й и 3-й фаз и сделаем соединения катушечных групп.

Обозначим номера фаз, начала и концы фаз, разметим направление токов в проводах катушек стрелками и проверим полярность полюсов.

Рассматривая схему обмотки, заметим, что в 6-м и 12-м пазах имеются встречные токи. Это не должно нас смущать, так как

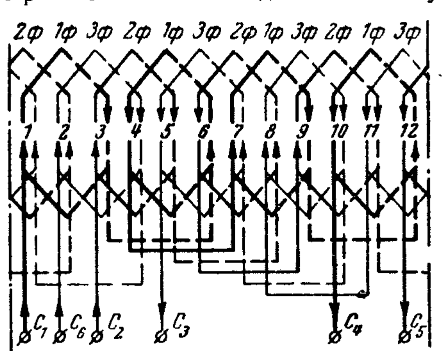


Рис. 40. Схема двухслойной обмотки.
$z = 12$; $2p = 4$; $q = 1$; $y = 2$.

в двухслойных обмотках при укорочении шага на один паз будут встречные токи в одном пазу на каждый полюс; при укорочении на два паза встречные токи будут в двух пазах на каждый полюс и т. д.

Пример. Проверить правильность построения обмотки статора вычислением некоторых обмоточных данных (рис. 40).

Дано: $z=12$; $2p=4$; $q=1$; $y=2$.

Число пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{z}{2pm_1}=\frac{12}{4\cdot 3}=1.$$

Число катушек в фазе равно: $\frac{n_к}{m}=\frac{12}{3}=4.$

Число катушечных групп в фазе равно:

$$\frac{n_к}{mq}=\frac{12}{3\cdot 1}=4.$$

Расстояние между началами фаз $2q=2\cdot1=2$.

Расстояние между началами катушечных групп в фазе — один диаметральный шаг, равный 3.

Пример. Составить схему обмотки статора четырехполюсного электродвигателя (рис. 41).

Дано: $z=24$; $2p=4$; $a=4$, где a — число параллельных ветвей.

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{24}{4\cdot3}=2.$$

Определяют число катушечных групп в обмотке:

$$n_{к.г}=\frac{n_к}{q}=\frac{24}{2}=12.$$

На каждую фазу приходится по четыре катушечные группы, в каждой катушечной группе две катушки.

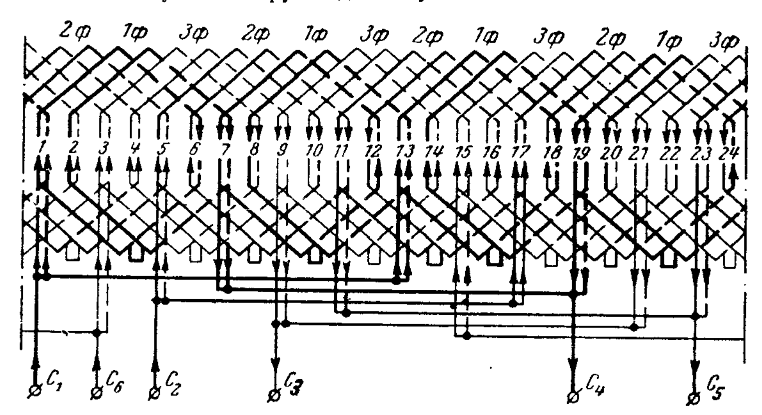


Рис. 41. Схема двухслойной обмотки.
$z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=5$; $a=4$.

Определяют диаметральный шаг обмотки:

$$y_д=\frac{z}{2p}=\frac{24}{4}=6.$$

Принимается укорочение шага на один паз, где $y=5$.

Левую сторону первой катушечной группы 1-й фазы укладывают в верхнюю часть 1-го и 2-го пазов, а правую сторону — в нижнюю часть 6-го и 7-го пазов.

Определяют пазы остальных катушечных групп 1-й фазы, начало которых должно отстоять от начала предыдущей на диаметральный шаг, почему и вторая катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 7-го и 8-го пазов, а правой — нижнюю

часть 12-го и 13-го пазов; третья катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 13-го и 14-го пазов, а правой — нижнюю часть 18-го и 19-го пазов; четвертая катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 19-го и 20-го пазов, а правой — нижнюю часть 24-го и 1-го пазов. Катушки катушечных групп соединяются, а фазы обозначаются соответствующим индексом. Соединений между катушечными группами не делается из-за наличия в обмотке четырех параллельных ветвей.

Определяют начала 2-й и 3-й фаз, расположенные через $2q$ друг от друга. Начало 2-й фазы выйдет из 5-го паза, а начало 3-й фазы — из 9-го паза.

Катушечные группы 2-й и 3-й фаз располагаются аналогично их размещению в 1-й фазе, а на катушечных группах отмечают номера фаз: буквами C_1, C_2, C_3 — их начала, а стрелками — направление токов в выводных концах.

Для образования четырех параллельных ветвей следует начало первой катушечной группы соеднннить с началом 3-й, концом 2-й н концом 4-й катушечных групп, а общий выводной провод будет началом фазы; конец первой катушечной группы соединить с концом 3-й, началом 2-й и началом 4-й катушечных групп, общий выводной провод будет концом фазы.

Обозначив концы фаз буквами C_4, C_5, C_6, проверяют правильность направления токов в проводах катушечных групп, соединительных и выводных проводах, полярность и чередование полюсов.

Рассматривая направление токов в пазах, можно видеть, что в 6-м, 12-м, 18-м и 24-м пазах имеются встречные токи нз-за укорочения шага обмотки на одни паз и поэтому на один полюс падает одни паз со встречными токами.

д) Двухслойные и однослойные трехфазные обмоткн с дробным числом пазов на полюс и фазу; дробное q

Дробное число пазов на полюс и фазу означает, что в данной обмотке число катушек в катушечных группах неодинаково, т. е. в одних катушечных группах число катушек на одну больше, чем в других.

Дробное значение числа пазов на полюс и фазу обозначается индексом q и представляется в виде дроби (правильной):

$$q = b + \frac{c}{d},$$

где b — целое число;
c — числитель дроби;
d — знаменатель дроби.

Число катушек в каждой фазе при двухслойной обмотке равно $2pq$, а при однослойной pq.

При дробном q часть катушечных групп выполняется из числа катушек, равном $(b+1)$, а часть из b катушек.

При составлении схем с дробным q следует из соседних катушек, равном $(bd+c)$, образовать d катушечных групп, из которых c катушечных групп с числом катушек в группе, равным $(b+1)$, и $(d-c)$ катушечных групп с числом катушек в группе, равным b.

Пример. Составить схему двухслойной обмотки статора, у которого $z=30$; $2p=4$; $a=1$.

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{30}{4\cdot 3}=2^1/_2 \text{ (рис. 42)},$$

где $b=2$; $c=1$; $d=2$.

Здесь часть катушечных групп состоит из $(b+1)=2+1=3$ катушек, а часть из $b=2$ катушек.

Схему следует составить из $(bd+c)=2\cdot 2+1=5$ соседних катушек и образовать $d=2$ катушечные группы, где $c=1$ катушечная группа будет состоять из $(b+1)=2+1=3$ катушек и $(d-c)=2-1=1$ катушечная группа, которая состоит из $b=2$ катушек.

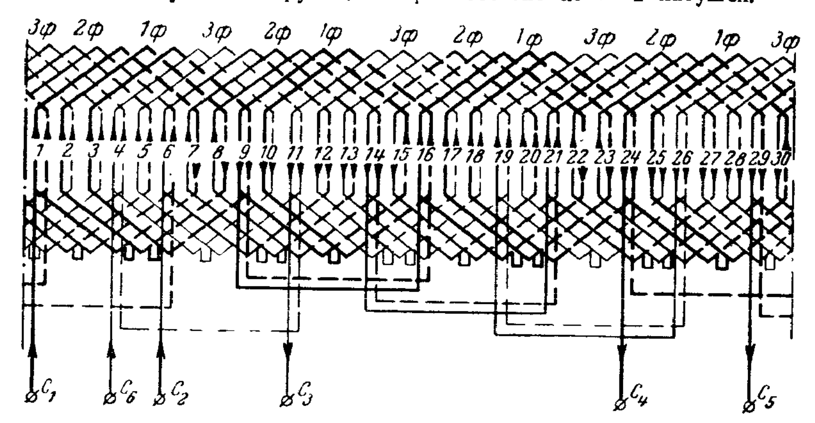


Рис. 42. Схема двухслойной обмотки.

$z=30$; $2p=4$; $q=2\frac{1}{2}$; $y=6$.

Число катушек в фазе равно будет $2pq=4\cdot 2\cdot {}^1/_2=10$, а число чередований катушечных групп равно:

$$\frac{2pm}{d}=\frac{4\cdot 3}{2}=6.$$

Таким образом, в цифровом выражении схема выглядит так: (3·2) (3·2) (3·2) (3·2) (3·2) (3·2), где цифры в скобках означают число катушек в катушечных группах, а скобки отделяют чередования (см. приложение 9 и рис. 42).

Определяют шаг по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{30}{4}=7{,}5.$$

Принимается укороченный шаг $y=6$.

Если величина дробной части q равна $1/2$, то расстояния между началами фаз будут равны $2q=2\cdot 2^{1}/_{2}=5$ и начало второй фазы будет в 6-м, а начало 3-й в 11-м пазу. Если произведение $2q$ не будет равно целому числу, его следует округлить до ближайшего целого числа, что и принимается за расстояние между началами фаз.

Для обмоток с дробным q диаметральный шаг обмотки также будет дробным, поэтому место катушечных групп в каждой фазе определяется в процессе построения схемы обмотки. Если одни катушечные группы состоят из трех катушек, а другие из двух катушек, то при одинаковом числе тех и других в фазе построение

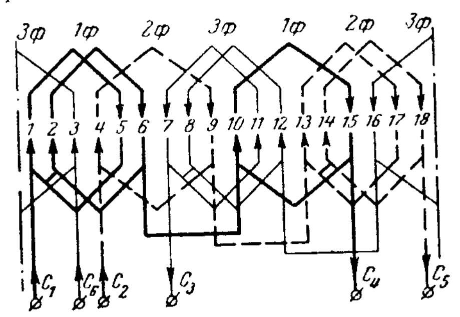


Рис. 43. Схема однослойной секционной обмотки.

$z=18;\ 2p=4;\ q=1\frac{1}{2};\ y_1=4;\ y_2=5.$

первой катушечной группы можно начать с любой, чередуя их при дальнейшем построении схемы в каждой фазе и обмотке в целом (см. приложение 9).

Разместив первые катушечные группы всех фаз, каждая из которых состоит из трех катушек, укладывают следующую катушечную группу 1-й фазы, состоящую из двух катушек, в 9-й и 10-й пазы. Дальнейшее построение обмотки упрощается тем, что чередование катушечных групп фаз уже определилось. Зная чередование катушечных групп фаз и чередование катушечных групп с двумя и тремя катушками в фазе, легко построить схему обмотки в целом, так как она ничем не отличается от построения обычных схем двухслойных обмоток.

Пример. Составить схему однослойной секционной обмотки четырехполюсного электродвигателя.

Дано: $z=18$; $2p=4$; $a=1$ (рис. 43).

Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{18}{4\cdot 3}=1\ ^{1}/_{2}=b+\frac{c}{d},$$

где $b=1$; $c=1$; $d=2$.

При однослойной обмотке число катушек в фазе равно $pq=2\cdot 1^{1}/_{2}=3$.

Часть катушечных групп будет состоять из $(b+1)=1+1=2$ катушек, а часть из $b=1$ катушки.

Из соседних катушек $(bd+c)=1\cdot2+1=3$ образуют $d=2$ катушечные группы, из которых $c=1$ катушечная группа состоит из $(b+1)=1+1=2$ катушек и $(d-c)=2-1=1$ катушечная группа, которая состоит из $b=1$ катушки.

Число чередований катушечных групп равно

$$\frac{pm}{d}=\frac{2\cdot3}{2}=3.$$

В цифровом выражении схема обмотки выразится следующими данными: (2·1) (2·1) (2·1).

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y=\frac{z}{2p}=\frac{18}{4}=4{,}5.$$

Для катушечной группы из двух секций шаг $y_1=4$, а для катушечной группы из одной секции $y_2=5$.

Начала фаз располагают на расстоянии $2q=2\cdot1^1/_2=3$ паза, значит начало 2-й фазы будет в 4-м, а начало 3-й фазы — в 7-м пазу.

Первые катушечные группы фаз располагают в пазах согласно принятым шагам, начала вторых катушечных групп фаз — на расстоянии двух диаметральных шагов от начала первых катушечных групп, т. е. на $2\cdot4{,}5=9$ пазов.

Дальнейшее построение схемы обмотки ничем не отличается от построения схем однослойных секционных обмоток.

Из приведенных примеров построения схем можно заключить следующее.

Во всех обмотках расстояние между началами фаз равно $2q$. В обмотках, имеющих дробное q, произведение $2q$ может быть не целым числом. В этих случаях за $2q$ принимается ближайшее целое число.

В однослойных секционных обмотках с целым q расстояние между началами двух соседних катушечных групп одной и той же фазы равно двойному диаметральному шагу, а в двухслойных обмотках с целым q — только диаметральному шагу.

В однослойных секционных обмотках «вразвалку» с целым q и одинаковым шагом по пазам расстояние

между началами двух соседних катушечных полугрупп одной и той же фазы равно диаметральному шагу.

В однослойных секционных и катушечных (концентрических) обмотках, включая обмотки «вразвалку», между сторонами катушек каждой катушечной группы располагается $2q$ сторон катушек других фаз. Исключением являются обмотки с дробным q и некоторые однослойные секционные обмотки «вразвалку», у которых стороны катушечных групп размещены не в рядом лежащих пазах, а вперемежку со сторонами катушечных групп других фаз (рис. 30).

В обмотках с дробным q, имеющих дробь $^1/_2$, отпадает необходимость подсчитывать, сколько будет катушечных групп с числом катушек, равным b, и сколько будет катушечных групп с числом катушек, равным $b+1$. Во всех обмотках, имеющих дробное q с дробью, равной $^1/_2$, числа катушечных групп с меньшим и бо́льшим количеством катушек распределяются поровну, и поэтому, зная число катушек в фазе, легко подсчитать, сколько будет больших и малых катушечных групп.

9. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ПРИ НАМОТКЕ ОБМОТОК

Много разновидностей обмоток электрических машин имеется, поэтому даже опытный обмотчик не всегда запоминает, построения той или иной схемы и поэтому перед началом намотки обмотчик обычно вычерчивает схему для пользования. Наличие готовых схем обмоток дает возможность более квалифицированно и осмысленно выполнять намотку и повышает производительность труда, так как при работе обмотчик, посмотрев схему, сразу видит место расположения начал фаз, шаг обмотки, количество катушек в катушечной группе, их расположение, наличие параллельных ветвей и место расположения концов фаз. Опытному обмотчику достаточно взглянуть на схему обмотки перед работой, а начинающим и малоопытным обмотчикам полезно пользоваться схемой во время выполнения работы.

В целях изучения схем обмоток приводятся еще некоторые из них.

На рис. 44 приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку»: числом пазов $z=36$, число полю-

сов $2p=4$, число параллельных ветвей $a=2$; число катушек в катушечной группе 3. Эта обмотка состоит из катушечных полугрупп с одной и двумя секциями, которые, располагаясь в фазе рядом, образуют три стороны, участвующие в создании полюса, что является характерным для обмоток «вразвалку». Между сторонами катушечной полугруппы любой фазы размещено $2q$ сторон катушек других фаз. Поэтому и получается разный шаг по пазам: в полугруппах с одной секцией $y_1=7$, а с двумя сек-

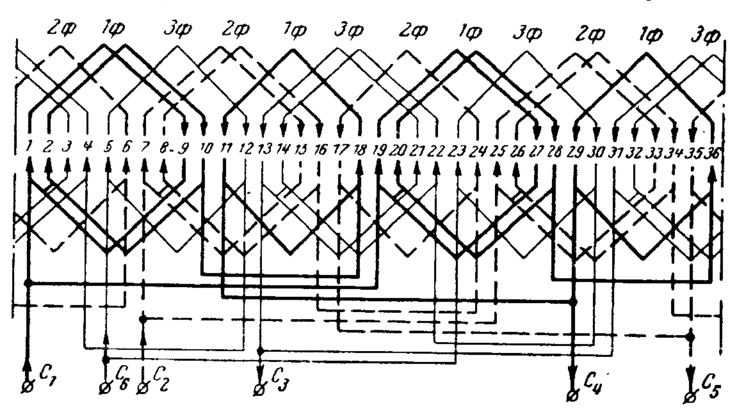


Рис 44. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку". $z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$; $a=2$.

циями $y_2=8$. В каждую параллельную ветвь входит одна с двумя секциями и одна с одной секцией. Обмотка выполнена так, что каждая фаза начинается с полугруппы с двумя секциями. Можно составить обмотку и так, чтобы каждая фаза начиналась с полугруппы с одной секцией, так как структура обмотки от этого не изменится.

На рис. 45 приведена схема двухслойной обмотки с числом пазов $z=36$, числом полюсов $2p=4$, числом параллельных ветвей $2a=2$. Укорочение шага здесь принято на два паза, поэтому на один полюс приходятся два паза со встречными токами (8-й, 9-й, 17-й, 18-й, 26-й, 27-й, 35-й, 36-й пазы), которые расположены симметрично (через девять пазов), что говорит о правильности составленной схемы. Следует иметь в виду, что расположение пазов со встречными токами в проводах, так же как и обозначение полярности полюсов, является дей-

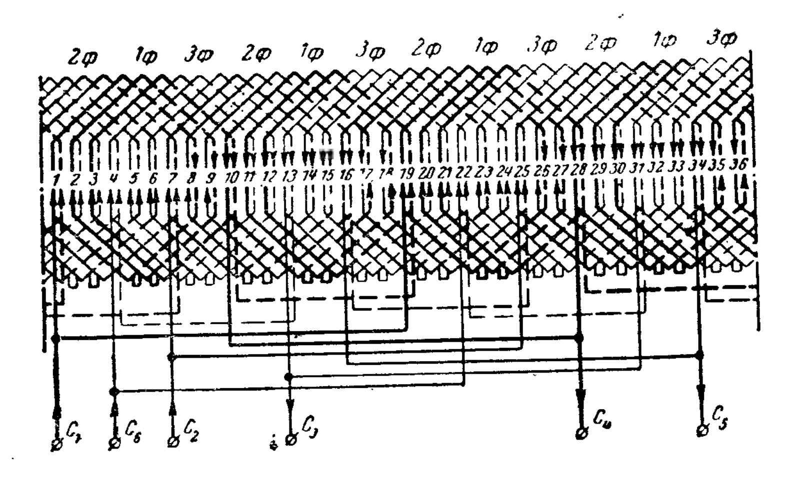


Рис. 45. Схема двухслойной обмотки.
$z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $y = 7$; $a = 2$.

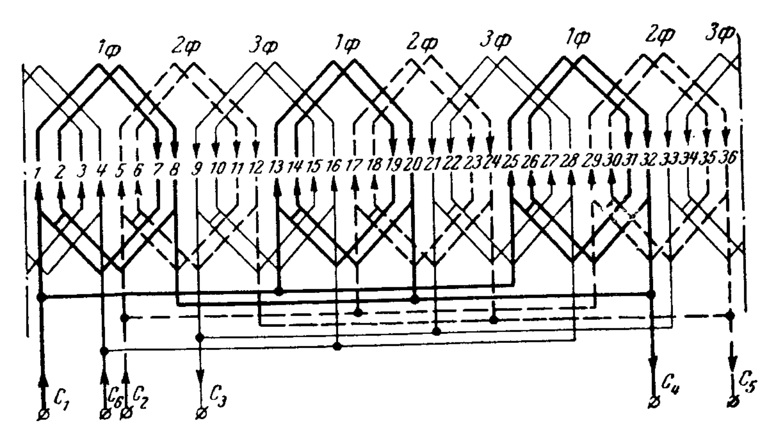


Рис. 46. Схема однослойной секционной обмотки.
$z = 36$; $2p = 6$; $q = 2$; $y = 6$; $a = 3$.

ствительным лишь для какого-то мгновения времени, так как по мере движения вращающегося магнитного поля по окружности расточки статора перемещаются и полюсы и встречные токи в проводах обмотки.

На рис. 46 приведена схема однослойной секционной обмотки электродвигателя с числом пазов $z=36$, числом параллельных ветвей $a=3$, числом пазов на полюс и фазу $q=2$ и диаметральным шагом обмотки, равным 6 ($y=6$). Каждая фаза имеет три катушечные группы с двумя секциями, а в параллельной ветви — одну с двумя секциями.

На рис. 47 приведена схема однослойной секционной обмотки «вразвалку», у которой число пазов $z=36$, число полюсов $2p=6$, число параллельных ветвей $a=2$, число пазов на полюс и фазу $q=2$ и число катушек в катушечной полугруппе равно одному. В параллельную

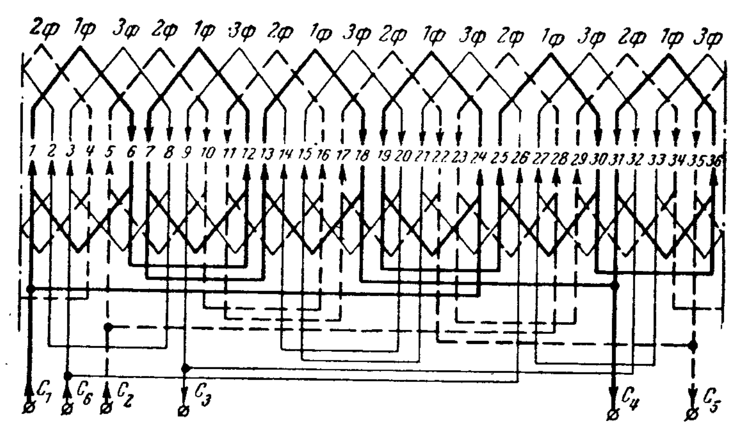


Рис. 47. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку". $z=36$; $2p=6$; $q=2$; $y=5$; $a=2$

ветвь входят три катушечные полугруппы по одной секции в каждой. Данную обмотку можно выполнить без параллельных ветвей, с двумя параллельными ветвями, с тремя и шестью параллельными ветвями. При образовании параллельных ветвей необходимо, чтобы каждая параллельная ветвь имела одинаковое число катушечных групп или полугрупп и чтобы общее число катушек в каждой параллельной ветви было одинаковым.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОБМОТКА РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

10. ВИДЫ ОБМОТОК РОТОРА

В зависимости от конструкции обмотки ротора делятся на короткозамкнутые и фазные.

Короткозамкнутые обмотки выполняются путем заливки пазов сердечника ротора алюминием с образованием короткозамкнутых колец и вентиляционных крыльев или укладкой в пазы медных, иногда латунных стержней, которые затем свариваются с медными короткозамыкающими кольцами.

Фазные обмотки ротора бывают двух видов: однослойные катушечные (концентрические) и двухслойные стержневые (волновые).

Катушечные (концентрические) обмотки ротора ничем не отличаются от катушечных (концентрических) обмоток статора, приведенных на рис. 27 и 35. Как правило, три выводных конца обмотки соединяют в звезду внутри схемы (начала или концы фаз), а другие три вывода выводят к контактным кольцам. В зависимости от величины шлица паза катушечные (концентрические) обмотки выполняют всыпными или впротяжку.

Обычно стержневые волновые обмотки применяются в более мощных электродвигателях.

Элементом стержневой обмотки является стержень, который занимает половину паза. Общее количество эффективных стержней в обмотке равно $2z$, эффективный стержень может состоять из двух или нескольких элементарных стержней, которые соединяются с другим эффективным стержнем в лобовой части обмотки.

Стержневые обмотки встречаются с четырьмя, шестью или восемью стержнями (эффективными) в пазу и тоже считаются двухстержневыми обмотками. При составлении таких схем считается, что роторы имеют удвоенное, утроенное или учетверенное число пазов, и, вычертив такое количество пазов, обмотку размещают так же, как и обычную двухстержневую.

11. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК РОТОРА

Составление схем катушечных (концентрических) обмоток рассмотрено выше (см. гл. 3). Исходными данными для составления схемы стержневых волновых обмоток являются: число пазов ротора z_2, число полюсов $2p$ и число параллельных ветвей в обмотке ротора a. Шаг волновой обмотки определяется так же, как и в петлевых, и равен числу пазов, разделенному на число полюсов. В противоположность петлевым обмоткам, где

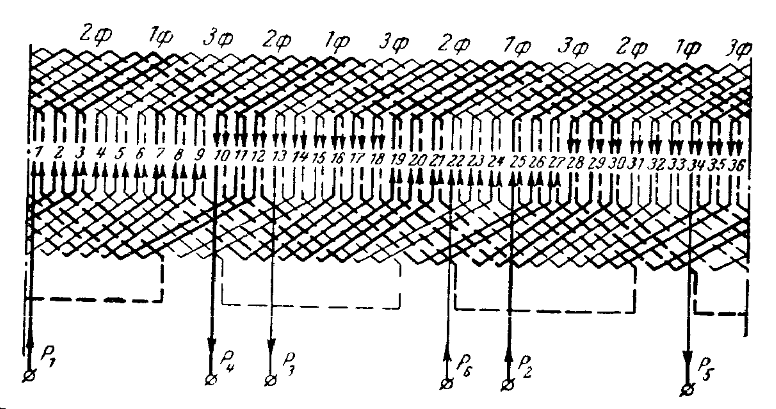


Рис. 48. Схема стержневой волновой обмотки ротора с укороченными переходами.

$z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $y_п = 9$; $y_{п.ук} = 8$; $y_з = 9$.

укорочение шага обмотки дает экономию меди, в волновых обмотках укорочение шага на расход меди не влияет, так как укорочение с одной стороны ротора влечет за собой удлинение шага обмотки с противоположной стороны. Поэтому волновые обмотки ротора выполняются с диаметральным шагом, за исключением переходов при каждом обходе обмотки, выполняемых с укороченным или удлиненным шагом.

На рис. 48 приведена схема стержневой волновой обмотки с укороченными переходами. Так как диаметральный шаг этой обмотки $y = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9$, то с задней стороны ротора и его передней стороны при обычном

ходе волны шаг диаметральный, а на переходах — укороченный.

Расположение стержней в пазах и их соединение в лобовой части по ходу волны следующие: начало 1-й фазы занимает верхнюю часть 1-го паза, вторая сторона катушки (секции) — нижнюю часть 10-го паза. Стержень, являющийся полукатушкой, расположенный в 1-м пазу, с задней стороны ротора соединен со стержнем, расположенным в нижней части 10-го паза, который в свою очередь с передней стороны ротора соединен со стержнем верхней части 19-го паза. Из 19-го паза, двигаясь по ходу волны, стержень попадает в нижнюю часть 28-го паза, а из 28-го паза, следуя по диаметральному шагу, он должен войти в верхнюю часть 1-го паза, так как $28+9=37$, а $z=36$. Но 1-й паз уже занят началом 1-й фазы, поэтому делается переход ко второй волне, для чего применяется укороченный шаг с передней стороны ротора $y_{п.ук}=8(9-1)$, и следующий по ходу стержень будет уже расположен на один паз ближе и займет верхнюю часть 36-го паза. Соединив этот стержень со стержнем, расположенным в 28-м пазу, и двигаясь дальше по ходу волны, попадают в 9-й, 18-й и 27-й пазы, откуда должны попасть в 36-й паз, но он уже занят, поэтому снова применяют укороченный шаг на один паз, расположив стержень в 35-м пазу, и начинают 3-й обход обмотки, перемещаясь из 35-го паза в 8-й, из 8-го — в 17-й, а из 17 — в 26-й паз.

Если далее продолжать движение в принятом направлении, то при укороченном шаге попали бы в 34-й паз, а при следующем обходе — в 33-й и т. д. Таким образом, после трех обходов обмотки получены только две катушечные группы, где каждая состоит из трех катушек, т. е. получены один слой обмотки и две катушечные группы вместо четырех.

Для получения двухслойной обмотки и недостающих двух катушечных групп изменяют направление обходов на обратное. Если обход обмотки был начат против часовой стрелки, то теперь его продолжают по часовой стрелке. В местах изменения направления обхода ставят перемычки, так как стержень, с которым он должен быть соединен, расположен на некотором расстоянии от него. Таким образом, продолжают движение по волне из нижней части 35-го паза в верхнюю часть 26-го, из

26-го — в нижнюю часть 17-го, из 17-го — в верхнюю часть 8-го паза, откуда должны были попасть в нижнюю часть 35-го паза, который занят, поэтому здесь опять шаг укорачивается на один паз и новый обход начинают из нижней части 36-го паза в верхнюю часть 27-го паза, из 27-го — в нижнюю часть 18-го, из 18-го в верхнюю часть 9-го, а из 9-го должны были попасть в 36-й паз, но он тоже занят, поэтому снова применяется укорочение шага, расположив стержень в 1-м пазу, и дальше продолжают движение в верхнюю часть 28-го, из 28-го — в нижнюю часть 19-го паза, из 19-го — в верхнюю часть 10-го паза, где и заканчивается третий и последний обход, так как этот стержень будет служить концом 1-й фазы. Аналогично укладываются остальные фазы после предварительного определения пазов, в которых разместятся начала фаз и перемычки, так как концы фаз определятся после размещения их обмоток.

Очень важно начала и концы фаз обмоток ротора и перемычки разместить симметрично по окружности во избежание небаланса, который приводит к вибрации ротора. Поэтому начала фаз лучше расположить на расстоянии 120 геометрических градусов друг от друга при сохранении электрической симметрии. Это условие может быть выполнено при расположении начал фаз друг относительно друга на 120 или 240 *эл. град.* плюс любое целое число, помноженное на 360 *эл. град.* При симметричном расположении по окружности ротора начала фаз, концы фаз и перемычки также симметрично разместятся.

В обмотке рис. 48 начала фаз расположены в 1-м, 25-м и 13-м пазах, что соответствует 480 *эл. град.* между фазами. Вычтя из 480 *эл. град.* 360, получится 120 *эл. град.*, следовательно, кроме геометрической, здесь выдержана и электрическая симметрия. Однако не все обмотки ротора можно выполнить с симметричным расположением начал, концов фаз и перемычек. При числе пар полюсов, кратном 3, выводы фаз и перемычки несимметрично расположатся по окружности и в этих случаях потребуется балансировка ротора.

Составляя схему обмотки ротора, целесообразно обозначить цифрами номера фаз, а стрелками — направле-

ние токов с проверкой правильности чередования полярности полюсов.

Выводные концы обмотки должны обозначаться согласно ГОСТ: начало 1-й фазы — P_1, начало 2-й фазы — P_2, начало третьей фазы — P_3, конец 1-й фазы — P_4, конец 2-й фазы — P_5, конец 3-й фазы — P_6.

На рис. 49 приведена схема стержневой волновой обмотки с данными, как по схеме рис. 48. Разница между этими схемами заключается лишь в том, что по рис. 49 выполнена схема с удлиненными переходами, а перемычки сдвинуты на четыре паза с сохранением

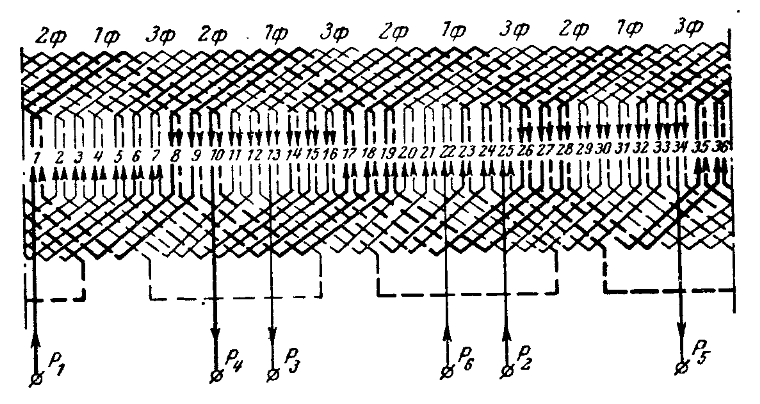


Рис. 49. Схема стержневой волновой обмотки ротора с удлиненными переходами.

$z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $y_п = 9$; $y_{п.уд} = 10$; $y_з = 9$.

симметрии. Составление схем стержневых волновых обмоток ротора более сложно, чем составление схем обмоток статора, поэтому при составлении схем обмоток ротора рекомендуется пользоваться таблицами по составлению схем роторных обмоток, составленных отдельно для обмоток с укороченными и отдельно с удлиненными переходами, при различном числе полюсов, пазов, шага обмотки (передний и задний), а также расположения начал и концов фаз и перемычек.

ГЛАВА ПЯТАЯ

СОКРАЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. РАСЧЕТ ОБМОТКИ РОТОРА

12. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Расчет обмоток электродвигателей сводится к определению необходимого количества эффективных проводов в пазу и сечения обмоточного провода.

При расчете обмоток следует стремиться к тому, чтобы, не выходя из допустимых для данного типа электродвигателей магнитных и электрических нагрузок, полностью использовать заложенные в электродвигателе активные материалы — электротехническую сталь и обмоточную медь или алюминий. Электродвигатели старых серий в большинстве случаев имеют заниженные магнитные и электрические нагрузки, что при пересчете иногда дает возможность несколько увеличить мощность. Кроме того, применение обмоточных проводов с более тонкой и теплостойкой изоляцией и изоляционных материалов с более высокой нагревостойкостью также дает возможность увеличить мощность электродвигателя, а в отдельных случаях — и произвести замену медных обмоточных проводов алюминиевыми с возможным сохранением прежней мощности. Вопрос замены медных обмоточных проводов алюминиевыми при сохранении номинальной мощности имеет большое народнохозяйственное значение, поэтому этот вариант не должен упускаться. При пересчете следует учитывать, что увлечение большими магнитными и электрическими нагрузками в активных частях электродвигателя недопустимо, так как это ведет к чрезмерному нагреву электродвигателя и резкому сокращению срока его службы.

О величине магнитной и электрической нагрузки электродвигателя судят по величине магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки. Магнитная индукция в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке различных типов электродвигателей различны по величине и колеблются в больших пределах. Есть, например, электродвигатели с максимальными магнитными индукциями в воздушном зазо-

ре, равными 3 500 *гс.* и электродвигатели с индукциями, равными 8 000—9 000 *гс.* Также встречаются электродвигатели с плотностью тока в обмотке статора, равной 2,1 *а* иа 1 *мм*² и 8,7 *а/мм*². Поэтому правильный выбор максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки представляет основную трудность при расчетах и пересчетах обмоток.

Магнитный поток, а значит, и величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре зависят от числа эффективных витков в фазе, что видно из формулы (10):

$$E_{\text{ф}1} = 4{,}44 k_{w1} w_1 f \Phi \cdot 10^{-8} \text{ в}, \qquad (10)$$

где $E_{\text{ф}1}$ — э. д. с. фазы обмотки статора, *в*,

k_{w1} — обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение шага обмотки статора и число катушек в катушечной группе;

w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора;

f — частота перемениого тока, *гц*;

Φ — магнитный поток, *мкс*.

Так как падение напряжения в статоре электродвигателя незначительно, э. д. с. $E_{\text{ф}1}$ можно приравнять к напряжению $U_{\text{ф}1}$ и для удобства анализа формулу (10) представить в следующем виде:

$$\Phi = \frac{U_{\text{ф}1} \cdot 10^{-8}}{4{,}44 k_{w1} w_1 f} \text{ мкс}. \qquad (11)$$

Из уравнения (11) видно, что при неизменных напряжении и частоте сети магнитный поток обратно пропорционален числу эффективных витков в фазе обмотки. Если число эффективных витков в фазе уменьшить, например, в 1,1 раза, то магнитный поток увеличится в 1,1 раза. Последствия от увеличения магнитного потока в 1,1 раза можно найти, анализируя приведенную ниже формулу, выражающую основной закон магнитной цепи,

$$\Phi = \frac{\text{м. д. с.}}{R_m} = \frac{m_1 k_{w1} w_1 I_\mu}{R_m}, \qquad (12)$$

где *м. д. с.* — магнитодвижущая сила;

R_m — магнитное сопротивление цепи магнитопровода;

m_1 — число фаз переменного тока обмотки статора;

k_{w1} — обмоточный коэффициент;

w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора;

I_μ — намагничивающий ток, *а*.

Если мы будем считать сопротивление магнитной цепи R_m постоянной величиной для данного электродвигателя, то переменными величинами в правой части формулы (12) являются эффективные витки фазы w_1 и намагничивающий ток I_μ, т. е. переменной величиной является произведение $I_\mu w_1$, иначе говоря, ампер-витки холостого хода. Увеличение магнитного потока в 1,1 раза вызывает и увеличение ампер-витков холостого хода в 1,1 раза. Так как причиной увеличения магнитного потока в 1,1 раза явилось уменьшение числа эффективных витков в фазе обмотки статора w_1 в 1,1 раза, следовательно, для того чтобы ампер-витки холостого хода увеличились в 1,1 раза, намагничивающий ток должен возрасти в $1{,}1 \cdot 1{,}1 = 1{,}21$ раза, т. е. в $1{,}1^2$.

Таким образом, уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает увеличение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока — в квадрате и, наоборот, увеличение эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает уменьшение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока — в квадрате.

Если при расчетах обмоток электрических машин незначительно отклоняться от расчетного числа эффективных витков в фазе, обусловленного нормальными магнитными нагрузками, то квадратичная зависимость между магнитным потоком (магнитной индукцией) и намагничивающим током будет соответствовать действительности, а при значительных отклонениях зависимость уже будет иной. Как известно, электротехническая сталь, применяемая для сердечников статоров и роторов электродвигателей, способна намагничиваться и изменять магнитную проницаемость; при этом насыщенная сталь резко уменьшает магнитную проницаемость.

Уменьшение магнитной проницаемости активной стали вызывает увеличение магнитного сопротивления цепи магнитопровода в целом, что вызывает в свою очередь и рост ампер-витков холостого хода, т. е. и намагничивающего тока. Следовательно, значительное уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора против расчетных вызывает увеличение намагничивающего тока из-за роста магнитного потока (магнитной индукции) и магнитного сопротивления цепи магнитопровода [см. формулу (12)].

В табл. 3 приведены данные изменения тока холостого хода в зависимости от изменения числа эффективных проводов в фазе обмотки статора электродвигателя типа А62-6 мощностью 10 *квт*, напряжением 220/380 *в*, 37/21,5 *а*, 1 000 *об/мин* производства Ярославского электромеханического завода. Напряжение поддерживалось постоянным (380 *в*), а изменению подвергались числа эффективных проводов в фазе обмотки статора, что вызывало соответствующие изменения величины магнитного потока (магнитной индукции) и тока холостого хода. Так как ток холостого хода трехфазного электродвигателя по величине мало отличается от намагничивающего тока:

$$I_{x.x} = (1{,}01 - 1{,}05)\, I_{\mu},$$

выводы из проведенного опыта можно отнести и к намагничивающему току.

Данные замера № 4 соответствуют заводским расчетным данным, где число эффективных проводов в фазе равно 324, величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре 8 800 *гс*, а замеренная величина тока холостого хода 8 *а*.

Из табл. 3 видно, что при увеличении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре в 1,5 раза ток холостого хода увеличился не в 2,25 раза, как было бы при квадратичной зависимости, а в 6,25 раза; при увеличении магнитной индукции в 1,73 раза ток холостого хода увеличился в 12,5 раза; при увеличении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода увеличился в 28,8 раза, превысив номинальный ток в 10,7 раза.

При уменьшении магнитной индукции в 1,5 раза ток холостого хода уменьшился в 2,7 раза; при уменьшении

Таблица 3

Данные изменения тока холостого хода в зависимости от изменения числа эффективных проводов фазы

№ замеров	1	2	3	4	5	6	7
Число эффективных проводов в фазе обмотки статора	972	648	486	324	216	187	162
Величина максимальной магнитной индукции, *гс*	2 930	4 400	5 860	8 800	13 200	15 200	17 600
Во сколько раз магнитная индукция изменилась против расчетной	Уменьшена в 3 раза	Уменьшена в 2 раза	Уменьшена в 1,5 раза	Расчетная	Увеличена в 1,5 раза	Увеличена в 1,73 раза	Увеличена в 2 раза
Величина тока холостого хода, *а*	0,6	1,2	2,7	8,0	50,0	100,0	230,0
Во сколько раз изменился ток холостого хода против нормальной величины	Уменьшен в 13,34 раза	Уменьшен в 6,66 раза	Уменьшен в 2,97 раза	Нормальный	Увеличен в 6,25 раза	Увеличен в 12,5 раза	Увеличен в 28,8 раза

магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода уменьшился в 6,66 раза; при уменьшении магнитной индукции в 3 раза ток холостого хода уменьшился в 13,34 раза. Более интенсивно изменяется ток холостого хода при увеличении магнитной индукции против расчетной, так как здесь сказывается влияние магнитного насыщения стали.

Влияние изменения числа эффективных проводов на параметры электродвигателя

При уменьшении числа эффективных проводов в пазу против расчетного уменьшается и коэффициент мощности ($\cos\varphi$), так как при этом увеличивается реактивная составляющая потребляемого из сети тока на намагничивание магнитопровода; также уменьшается и к. п. д. электродвигателя из-за возрастания потерь в активной стали. Наряду с этим увеличиваются пусковой и максимальный моменты вращения, что является положительным моментом. При значительном снижении числа эффективных проводов против расчетных ток холостого хода и нагрев активных частей электродвигателя резко возрастают.

При увеличении числа эффективных проводов в пазу статора против расчетного $\cos\varphi$ увеличивается, но к. п. д., пусковой и максимальный моменты вращения уменьшаются. При значительном увеличении числа эффективных проводов в пазу (за счет уменьшения сечения провода) потери на нагрев обмотки значительно возрастают и резко снижается мощность электродвигателя.

Вторым, не менее важным вопросом при расчетах обмоток электродвигателей является выбор сечения обмоточных проводов обмотки. Сечение обмоточных проводов выбирают, исходя из допустимой плотности тока, качества изоляционных материалов, изоляции обмоточного провода и условий, в которых работает двигатель. Заниженная плотность тока ведет к недоиспользованию обмоточных материалов и занижению мощности электродвигателя, а чрезмерная плотность тока влечет за собой чрезмерный нагрев и сокращение срока службы электродвигателя. Между тем применение проводов с более нагревостойкой изоляцией позволяет увеличить

плотность тока в проводах, повысить мощность электродвигателя или продолжительность его безаварийной работы. Улучшение условий охлаждения дает возможность повысить плотность тока в обмотке, а иногда и увеличить мощность электродвигателя.

При выборе плотности тока следует руководствоваться данными заводов-изготовителей для подобных типов электродвигателей, если при этом характер изоляции и марка проводов не меняются. При правильном выборе числа эффективных проводов в пазу статора и их сечения степень заполнения паза статора будет нормальной.

В технической литературе по ремонту электродвигателей и расчету обмоток нет единого метода для определения величины коэффициента заполнения паза. Одни авторы коэффициентом заполнения паза считают отношение площади всех изолированных проводов в пазу ко всей площади паза, другие — отношение площади всех изолированных проводов в пазу к площади паза за вычетом клина и пазовой изоляции. Второй метод определения коэффициента заполнения паза точнее, особенно для узких пазов. Первый метод менее точен, но проще и практичнее. Иногда пользуются условным значением коэффициента заполнения паза, вычисляемым по формуле

$$k_{п} = \frac{N d_{из}^{2}}{S_{п.из}},$$

где N — число проводов в пазу;

$d_{из}$ — диаметр провода с изоляцией;

$S_{п.из}$ — площадь паза за вычетом пазовой изоляции и клина.

Подсчитанный по этой формуле коэффициент заполнения паза не должен превышать 0,75.

При исчислении коэффициента заполнения паза по первому методу можно пользоваться следующими числовыми значениями[1]:

---

[1] С. К. Андриевский и М. Н. Шапиро, Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры, Гостехиздат, УССР, 1952.

а) для трапециевидных пазов при однослойной обмотке

$$k_п=0,37—0,45;$$

То же при двухслойной обмотке

$$k_п=0,35—0,42;$$

б) для овальных пазов при однослойной обмотке

$$k_п=0,42—0,55;$$

То же при двухслойной обмотке

$$k_п=0,37—0,45.$$

Меньшее значение коэффициента заполнения паза принимают для двигателей меньшей мощности.

Замена одного провода двумя или несколькими эквивалентного сечения. При выполнении обмотки статора часто наряду с параллельными ветвями приходится применять и параллельные провода. Замена одного провода двумя или несколькими каждый в отдельности с одинаковым сечением производится довольно часто. Замена же одного провода двумя или несколькими параллельными проводами разных сечений встречается реже; о допустимости такой замены имеются разные мнения. Однако многочисленные опыты подтверждают, что при том числе витков, которое имеется в обмотках электродвигателей, токи в параллельных проводах практически распределяются пропорционально сечениям проводов и обратно пропорционально их активным сопротивлениям, что позволяет производить замену одного провода двумя или несколькими проводами разного сечения. Однако больше трех параллельных проводов применять не рекомендуется, так как при этом снижается коэффициент заполнения паза за счет дополнительной изоляции проводов и воздушных прослоек между проводами. В приложении *1* приведены варианты замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по их суммарному сечению.

13. РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Много методов и способов приближенных и сокращенных расчетов обмоток электродвигателей существует и применяется при пересчете электрических двигателей,

однако не все они достаточно точны при определений расчетных параметров.

Одним из наиболее простых и достаточно точных методов расчета статорных обмоток электродвигателей мощностью до 100 *квт* является изложенный ниже.

Для определения числа эффективных проводов в пазу статора в основу расчета берется приближенная формула

$$N_{п} = \frac{2,6 U_{ф} p \cdot 10^{6}}{D_{в} L z B_{в}}, \qquad (13)$$

где $U_{ф}$ — фазное напряжение, *в*;
p — число пар полюсов;
$D_{в}$ — внутренний диаметр статора (диаметр расточки) *см*;
L — длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*;
z — число пазов статора;
$B_{в}$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*.
2,6 — коэффициент, учитывающий частоту $f = 50$ *гц* и другие постоянные или принятые постоянными величины.

Расчет по этой формуле производится с учетом того, что обмоточный коэффициент принят равным 0,93, падение напряжения в обмотке — равным 4% величины напряжения и синусоидальности формы поля.

При выполнении расчета электродвигателя, имеющего паспорт, но не имеющего обмотки, задаются величиной максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом типа электродвигателя.

Таблица 4

Мощность электродвигателя P, *квт*	Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре $B_{в}$, *гс*
До 1,0	3 500—6 000
1,1—5,0	4 500—7 200
Свыше 5	5 000—8 000

Ориентировочно при выборе максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре можно пользоваться табл. 4.

При подсчете по формуле (13) числа эффективных проводов в пазу статора целесообразно пользоваться

постоянными коэффициентами (табл. 5) для фазного напряжения 220 *в* при различном числе полюсов и числе пазов статора. Числовые значения постоянных коэффициентов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Постоянные коэффициенты для подсчета числа эффективных проводов в пазу статора электродвигателя при фазном напряжении 220 *в*

z \ $2p$	2	4	6	8
18	31,8	63,6	95,2	
24	23,8	47,6		95,2
27	21,2	42,4	63,6	84,8
30	19,1	38,2		76,4
36	15,9	31,8	47,6	63,6
48	11,9	23,8		47,6
54		21,2	31,8	42,4
72		15,9	23,8	31,8

Коэффициенты таблицы включают в себя величины

$$C = \frac{2{,}6U_{\text{ф}}p}{z}.$$

Для определения числа эффективных проводов в пазу статора формула примет следующий вид:

$$N_{\text{п}} = \frac{C \cdot 10^6}{D_{\text{в}}LB_{\text{в}}}. \quad (14)$$

Например, для электродвигателя с числом полюсов $2p=4$ и числом пазов $z=36$ количество эффективных проводов в пазу по формуле (14) равно:

$$N_{\text{п}} = \frac{31{,}8 \cdot 10^6}{D_{\text{в}}LB_{\text{в}}},$$

где число 31,8 взято из табл. 5.

Если быть уверенным, что величина максимальной индукции в воздушном зазоре выбрана правильно, то на этом можно было бы окончить определение числа эффективных проводов в пазу. Однако даже опытный расчетчик не в состоянии точно определить, какая вели-

чина индукции соответствует данному электродвигателю, так как она различна не только для различных типов электродвигателей, но даже при одном типе и колеблется в больших пределах. Так, в электродвигателях типа Р максимальная индукция в воздушном зазоре находится в пределах 5 600—7 200 *гс*, в электродвигателях типа АД — в пределах 5 000—8 300 *гс*, в электродвигателях типа МА — 5 000—9 300 *гс*, в электродвигателях типа ТТ — 3 800 — 7 200 *гс*, в электродвигателях типа МКА, МКБ — 4 500—7 900 *гс*. Не в меньших пределах величина максимальной индукции в воздушном зазоре колеблется и в электродвигателях иностранных фирм.

Поэтому при расчете обмоток следует проверять правильность выбранной величины максимальной индукции в воздушном зазоре с вычислением магнитных нагрузок в зубце и спинке активной стали статора.

Индукцию в зубце статора можно проверять по следующей формуле:

$$B_z = 3{,}5 \frac{B_в D_в}{z b_z}, \qquad (15)$$

где $B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;
$D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
z — число пазов статора;
b_z — расчетная ширина зубца;
3,5 — коэффициент, включающий в себя постоянные величины и коэффициент заполнения стали, принятый равным 0,9.

Расчетная ширина зубца берется между самым широким и самым узким размерами зубца, отступая на $1/3$ длины от узкой в сторону широкой.

Индукцию в спинке статора можно проверять по формуле (16):

$$B_а = 0{,}6 \frac{B_в D_в}{p h_с}, \qquad (16)$$

где $B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;
$D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
p — число пар полюсов;
$h_с$ — высота спинки статора, *см*;

0,6 — коэффициент, включающий в себя коэффициент магнитного перекрытия, принятый равным 0,7, коэффициент заполнения активной стали, принятый равным 0,9, и постоянные величины.

Вычисленные магнитные индукции в зубце статора должны находиться в пределах 13 000—17 000 *гс*, а в спинке статора — в пределах:

при $2p=2$ 12 000—17 000 *гс*;

при $2p>2$ 10 000—15 000 *гс*.

Если индукция в зубце и спинке статора значительно отклоняется от указанных выше предельных величин, надлежит увеличить или уменьшить величину максимальной индукции в воздушном зазоре и в зависимости от полученных результатов окончательно подсчитать число эффективных проводов в пазу. При пересчете целесообразно применить способ пропорционального пересчета.

Если напряжение электродвигателя отличается от $U_ф=220$ *в*, принятого по табл. 5, то коэффициент по табл. 5 следует увеличить или уменьшить пропорционально изменению напряжения.

Например, при $U_ф=380$ *в* постоянный коэффициент умножается на 1,73, при $U_ф=127$ *в* — делится на 1,73, а при $U_ф=290$ *в* — умножается на $\frac{290}{220}=1{,}32$ и т. д.

При расчетах обмотки электродвигателя, не имеющего паспортных данных и старой обмотки, расчет приходится вести, задавшись наиболее вероятной скоростью вращения электродвигателя, исходя из конфигурации сердечника статора. Сравнительно большая высота спинки статора свидетельствует о быстроходности электродвигателя, а малая — о тихоходности. Выполнив расчет, можно по величине магнитной индукции в спинке статора определить, правильно ли задались скоростью вращения электродвигателя. Если магнитная индукция в спинке статора резко не выходит за пределы допустимых величин, то принятая при расчете скорость вращения соответствует паспортной. При малых индукциях в спинке статора расчет следует повторить, приняв более высокую скорость вращения, а при больших индукциях—наоборот. При определении приемлемости приня-

той индукции имеется в виду, что в воздушном зазоре и зубце статора она также не выходит из предела допустимых величин.

Для определения числа полюсов электродвигателя можно пользоваться формулой, позволяющей определить наименьшее число полюсов, допустимое в данном электродвигателе:

$$2p = 0{,}5 \cdot \frac{D_в}{h_c} *, \qquad (17)$$

где $D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
$h_с$ — высота спинки статора, *см*.

Полученный результат следует округлить до ближайшего четного числа.

Число полюсов электродвигателя можно точнее определить по формуле

$$2p = \frac{B_в D_в L}{B_a L_c h_c}, \qquad (18)$$

где $B_в$ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*;
$D_в$ — внутренний диаметр статора, *см*;
L — длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*;
$B_а$ — индукция в спинке статора, *гс*;
$L_с$ — чистая длина активной стали статора без изоляции между листами сердечника, *см*;
$h_с$ — высота спинки статора, *см*.

При определении числа полюсов электродвигателя по формуле (18) следует задаться максимальной индукцией в воздушном зазоре $B_в$ и индукцией в спинке статора $B_а$. Полученное число полюсов следует округлить до ближайшего четного числа и повторно определить величину индукции в спинке статора. Если индукция в спинке статора все же будет выходить за пределы допустимых величин, следует изменить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре до величины, при которой индукция в спинке статора будет находиться в пределах норм. По формуле (15) определяют индукцию в зубце статора, а по формуле (14) — число эффективных проводов в пазу.

---

* «Энергетик», 1959, № 7, статья В. В. Серкова.

При приведении сокращенного расчета предполагалось, что ремонтируемый электродвигатель не имеет обмотки. Если же необходимо только проверить правильность старой обмотки электродвигателя, подлежащей замене, то повторных пересчетов для определения максимальной индукции в воздушном зазоре не требуется, так как она будет определена по фактическому числу эффективных проводов в пазу. Перерасчет потребуется только в случае, если у поступившего в ремонт электродвигателя неправильная обмотка, что может быть определено по величине магнитных нагрузок в воздушном зазоре, зубце и спинке статора.

Следующей стадией расчета будет определение сечения обмоточного провода новой обмотки.

Сечение одного эффективного провода с изоляцией определится по формуле

$$F_{и} = \frac{k_{п} S_{п}}{N_{п}} \text{ мм}^2, \tag{19}$$

где $k_{п}$ — коэффициент заполнения паза;
$S_{п}$ — площадь паза;
$N_{п}$ — количество эффективных проводов в пазу.

Коэффициент заполнения паза принимается исходя из данных, изложенных в предварительных сведениях к расчету.

Площадь паза легко подсчитать, сделав оттиск его на миллиметровой бумаге и построив на нем равновеликий прямоугольник.

Далее выбирают число параллельных ветвей и число параллельных проводов в зависимости от величины полученного при расчете сечения одного эффективного провода с изоляцией.

Сечение одного элементарного провода с изоляцией подсчитаем по формуле

$$s_{1из} = \frac{F_{из}}{a \cdot b}, \tag{20}$$

где a — число параллельных ветвей;
b — число параллельных проводов.

Число параллельных проводов и параллельных ветвей выбирается так, чтобы элементарный провод свободно входил в шлиц паза статора.

Диаметр элементарного изолированного провода определяется или по таблице перевода сечений в диаметры, или по формуле

$$d_{из} = 1{,}13\sqrt{s_{1из}}.$$

Диаметр голого провода определяется методом вычитания от изолированного провода толщины его изоляции:

$$d = d_{из} - \delta_{из},$$

где $\delta_{из}$ — двусторонняя толщина изоляции.

Величину $\delta_{из}$ можно брать из каталогов и справочников.

По диаметру голого провода найдем его сечение.

Если нет уверенности в правильном выборе коэффициента заполнения паза, можно один паз статора заполнить пазовой изоляцией и проводом полученного сечения и подсчитать фактическое количество проводов. Если расчетное количество элементарных проводов не вмещается в паз, необходимо сечение провода уменьшить, и наоборот, если паз не заполняется, следует сечение увеличить. В обоих случаях производится перерасчет сечения. Практически это выполняется так.

Заполняют данным проводом изолированный паз, оставив место для клина.

Подсчитывают количество вложенных элементарных проводов.

Вычисляют суммарную площадь, занятую медью, перемножением количества элементарных проводов на их сечение.

Полученную площадь меди делят на расчетное количество элементарных проводов с изоляцией.

По полученному сечению элементарного провода находят его диаметр по таблице или расчету, где $d = \sqrt{\frac{4}{\pi} s_1}$.

При переходе на иной вид изоляции провода вычисляют не суммарную площадь меди, а суммарную площадь изолированных проводов, разделив которую на расчетное количество элементарных проводов, определяют сечение элементарного провода с изоляцией, а за вычетом двусторонней толщины изоляции — и диаметр голого провода.

Зная сечение обмоточного провода, можно вычислить плотность тока и сравнить ее с допустимой для электродвигателей данного типа:

$$\Delta = \frac{I_ф}{abs_1}, \qquad (21)$$

где $I_ф$ — фазный ток электродвигателя (при соединении обмотки звездой $I_ф = I_л$; при соединении треугольником $I_ф = I_л/\sqrt{3}$);

a — число параллельных ветвей;

b — число параллельных проводов;

s_1 — сечение элементарного провода;

$I_л$ — линейный ток.

Допустимую плотность тока можно определить по табл. 6.

Таблица 6

Рекомендуемые плотности тока

Мощность электродвигателя, *квт*	Синхронная скорость вращения, *об/мин*	Плотность тока в обмотке статора, *а/мм²*
0,1—1,0	3 000 1 500	4,5—6,8 4,0—6,3
1,1—5,0	3 000 1 500 1 000	5,5—7,5 4,8—7,2 4,5—6,7
5,1—10,0	3 000 1 500 1 000 750	5,0—7,2 4,5—7,0 4,3—6,5 4,1—6,2
10,1—25,0	3 000 1 500 1 000 750	5,0—7,0 4,5—6,5 4,3—6,3 4,1—6,0
25,1—100	3 000 1 500 1 000 750	4,8—6,6 4,3—6,0 4,0—5,5 3,8—5,3

Для электродвигателей закрытого и взрывобезопасного исполнения плотности тока берутся ближе к нижнему пределу. Для обмоток фазных роторов плотность

тока берется в 1,35—1,45 раза большей, чем для обмоток статора.

Если мощность электродвигателя неизвестна, то задаются плотностью тока и определяют фазный ток электродвигателя, после чего вычисляют мощность электродвигателя:

$$P = \frac{3U_{ф}I_{ф}\cos\varphi\eta}{1\,000}\ квт, \tag{22}$$

где $U_{ф}$ — фазное напряжение;

$I_{ф}$ — фазный ток.

Косинус φ и к. п. д. берутся в зависимости от мощности и числа оборотов электродвигателя. Таблицы значений косинуса φ и к. п. д. приведены в приложениях 5 и 6.

14. РАСЧЕТ ОБМОТКИ РОТОРА

При ремонте расчет обмотки фазного ротора производят, если отсутствует в нем старая обмотка или при необходимости изменения числа оборотов.

При пересчете обмотки статора на новое напряжение, а обмотка ротора (при наличии такой), остается без изменения, напряжение на его кольцах, а также фазный ток будут прежними. Порядок расчета фазного ротора при отсутствии обмотки в нем следующий: э. д. с. фазного ротора при режиме короткого замыкания равна

$$E_{ф2} = E_{ф1}\frac{k_{w2}w_2}{k_{w1}w_1}\ в, \tag{23}$$

где $E_{ф2}$ — фазная э. д. с. ротора;

$E_{ф1}$ — фазная э. д. с. статора;

k_{w2} — обмоточный коэффициент обмотки ротора;

k_{w1} — обмоточный коэффициент обмотки статора;

w_2 — число эффективных витков в фазе обмотки ротора;

w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора и ротора, которые незначительны по величине, и обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора приравнять, что также допустимо, то для определения

фазного напряжения на разомкнутых кольцах ротора можно применить следующую формулу:

$$U_{ф2}=U_{ф1}\frac{w_2}{w_1}\ в, \qquad (24)$$

откуда

$$w_2=\frac{w_1 U_{ф2}}{U_{ф1}}, \qquad (25)$$

где $U_{ф2}$ — фазное напряжение на кольцах ротора.
$U_{ф1}$ — фазное напряжение статора.

Поскольку в формулах (24) и (25) неизвестными являются фазное напряжение на кольцах ротора и число эффективных витков в фазе обмотки ротора, то величиной напряжения обмотки ротора следует задаться. При выборе линейного напряжения на кольцах ротора можно пользоваться табл. 7.

Таблица 7

Величина линейного напряжения на кольцах ротора в зависимости от мощности электродвигателя

Вид обмотки	Линейное напряжение на кольцах ротора, *в*	
	$P=3\div20$ *квт*	$P=20\div100$ *квт*
Волновая стержневая	100—290	150—290
Катушечная	100—290	220—340

Фазное напряжение обмотки ротора при соединении звездой будет равно:

$$U_{ф2}=\frac{U_{л2}}{\sqrt{3}}\ в.$$

Число эффективных витков в фазе обмотки статора определяют по формуле

$$w_1=\frac{N_{п1}z_1}{2m_1}=\frac{N_{п1}z_1}{2\cdot3}=\frac{N_{п1}z_1}{6}, \qquad (26)$$

где w_1 — число эффективных витков в фазе обмотки статора;
$N_{п1}$ — число эффективных проводов в пазу статора;
z_1 — число пазов статора;
m_1 — число фаз обмотки статора,

Вычислив число эффективных витков в фазе обмотки ротора, определяют число эффективных проводов в пазу ротора по формуле

$$N_{п2} = \frac{2m_2 w_2}{z_2} = \frac{2 \cdot 3w_2}{z_2} = \frac{6w_2}{z_2}, \qquad (27)$$

где $N_{п2}$ — число эффективных проводов в пазу ротора;
m_2 — число фаз обмотки ротора;
w_2 — число эффективных витков в фазе обмотки ротора;
z_2 — число пазов ротора.

Определяют ток ротора:

$$I_{ф2} = (0{,}9 \div 0{,}85)\, I_{ф1} \frac{w_1}{w_2}\ a, \qquad (28)$$

где $I_{ф2}$ — фазный ток ротора;
$I_{ф1}$ — фазный ток статора.

Задаются плотностью тока в обмотке ротора, исходя из соображений, изложенных в предварительных сведениях к расчету, выбирают число параллельных ветвей и параллельных проводов и определяют сечение элементарного провода обмотки ротора:

$$s_2 = \frac{I_{ф2}}{a_2 b_2 \Delta_2}\ мм^2, \qquad (29)$$

где s_2 — сечение элементарного провода обмотки ротора, $мм^2$;
a_2 — число параллельных ветвей обмотки ротора;
b_2 — число параллельных проводов обмотки ротора;
Δ_2 — плотность тока в обмотке ротора, $а/мм^2$.

По сечению определяют диаметр провода, где $d = \sqrt{\frac{4}{\pi} s_2}$, или по справочной таблице. Диаметр изолированного провода равен

$$d_{из2} = d_2 + \delta_{из},$$

где $d_{из2}$ — диаметр изолированного провода обмотки ротора;
d_2 — диаметр провода обмотки ротора;
$\delta_{из}$ — двусторонняя толщина изоляции провода.

По диаметру изолированного провода определяют и его сечение. Для определения коэффициента заполнения

паза ротора снимают при помощи бумаги оттиск паза и на нем строят равновеликий прямоугольник и вычисляют площадь паза $S_{п2}$ и коэффициент его заполнения, пользуясь формулой

$$k_{п2} = \frac{s_{из2} N}{S_{п2}}, \qquad (30)$$

где N — количество элементарных проводов в пазу ротора.

Коэффициент заполнения паза должен находиться в пределах величин, указаных в предварительных сведениях к расчету. Для стержневой обмотки коэффициент заполнения паза обычно равен 0,46—0,55. При значительных отклонениях коэффициента заполнения паза от нормальной величины следует заполнить один паз ротора сечением провода, полученного при расчете, и подсчитывают число проводов. Если расчетное число элементарных проводов не вместилось в паз, следует диаметр провода уменьшить; если же не заполняет паз, диаметр провода следует увеличить.

15. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ДРУГУЮ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ

Чтобы изменить скорость вращения электродвигателя, необходимо изменить число полюсов в статоре и фазном роторе. Это достигается изменением шага и числа катушек в катушечной группе в обмотках статора и фазного ротора при перемотке электродвигателя.

Перевод электродвигателя на другое число полюсов при неизменном напряжении, частоты и индукции в воздушном зазоре связан с изменением магнитного потока, который изменяется обратно пропорционально числу полюсов и прямо пропорционально числу оборотов. Если четырехполюсный электродвигатель переделать на двухполюсный, т. е. уменьшить число полюсов в 2 раза, то полюсное деление τ и сечение в воздушном зазоре[1] также увеличатся в 2 раза, в результате чего при преж-

---

[1] Сечением в воздушном зазоре называется поверхность расточки статора, равная произведению полюсного деления τ на расчетную дляну статора L_i и на коэффициент магнитного перекрытия α. Расчетная длина равна полусумме дляны сердечника статора с вентиляционными каналами и длины без них.

нем значении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре магнитный поток увеличится в 2 раза. Так как напряжение и частота остаются без изменения, с увеличением магнитного потока, приходящегося на полюс, в 2 раза необходимо уменьшить и число эффективных проводов в пазу статора в 2 раза, что дает возможность сечение обмоточного провода увеличить в 2 раза и соответственно увеличить мощность.

Обозначив число оборотов, мощность, число эффективных проводов в пазу и сечение эффективного провода принятыми ранее буквами с индексом «ст» для старых данных и с индексом «нов» для новых данных и установим соотношение между ними.

Число эффективных проводов в пазу при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старой скорости вращения и обратно пропорционально новой скорости вращения:

$$N_{\text{п.нов}} = N_{\text{п.ст}} \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{нов}}}. \quad (31)$$

При переходе на новую скорость вращения мощность изменяется примерно пропорционально новой скорости вращения и обратно пропорционально старой скорости вращения:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \frac{n_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}}}. \quad (32)$$

Учитывая изменения коэффициента мощности и к. п. д. при новой скорости вращения электродвигателя, его новая мощность будет равна:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \frac{n_{\text{нов}} \cos \varphi_{\text{нов}} \eta_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}} \cos \varphi_{\text{ст}} \eta_{\text{ст}}}. \quad (33)$$

Сечение эффективного провода при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старому числу эффективных проводов в пазу и обратно пропорционально новому числу эффективных проводов в пазу:

$$F_{\text{нов}} = F_{\text{ст}} \frac{N_{\text{п.ст}}}{N_{\text{п.нов}}}. \quad (34)$$

Необходимо подчеркнуть, что пользоваться приведенными выше формулами (31), (32), (33) и (34) можно

лишь в том случае, если максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре оставлена при пересчете электродвигателя на другую скорость вращения неизменной, что не всегда удается. Электродвигатели в большинстве случаев конструируют так, чтобы полностью использовать активную сталь, не допуская резерва для значительного увеличения магнитных нагрузок. При уменьшении числа оборотов электродвигателя затруднений для сохранения прежней величины максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не встречается; число полюсов увеличится, полюсное деление τ уменьшится, магнитный поток уменьшится. Уменьшение магнитного потока вызовет соответственное увеличение числа эффективных проводов в пазу, уменьшение эффективного сечения провода и снижение мощности электродвигателя. Магнитная индукция в зубце статора останется прежней, а магнитная индукция в спинке сердечника статора снизится.

При увеличении скорости вращения в $1^1/_2$ и особенно в 2 раза часто нельзя сохранить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре неизменной из-за сильно возросшей магнитной индукции в спинке статора. В этих случаях максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре уменьшают до такой величины, при которой магнитная индукция в спинке статора не будет выходить за пределы допустимых величин. Уменьшение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре повлечет за собой увеличение числа эффективных проводов в пазу против величины, вычисленной по формуле (31), почему и сечение эффективного провода придется уменьшить; в связи с этим снизится и мощность электродвигателя по сравнению с величиной, вычисленной по формуле (33). Поэтому при пересчете электродвигателей на бо́льшую скорость вращения необходимо производить расчет магнитных нагрузок, как показано в примере расчетов 6, и не ограничиваться только формулами (31), (32), (33) и (34), которыми в основном можно пользоваться при уменьшении числа оборотов электродвигателя.

Ход расчета обмотки фазного ротора при переходе на другие числа оборотов показан в примере расчетов.

При пересчетах электродвигателей на другую скорость вращения необходимо учитывать и следующее.

При снижении скорости вращения ухудшается охлаждение электродвигателя, в связи с чем полученную по формуле (33) мощность рекомендуется уменьшить на 10—15%. При увеличении скорости вращения плотность тока можно повысить на 10—15% и соответственно мощность электродвигателя.

При переходе на новую скорость вращения может измениться номинальный вращающий момент электродвигателя, поэтому в таких случаях следует предварительно рассчитать достаточность момента для данной нагрузки.

Для определения номинального вращающего момента электродвигателя применяется следующая формула:

$$M = 975 \frac{P}{n} \text{ кГ·м}, \tag{35}$$

где P — номинальная мощность электродвигателя, *квт*;
n — число оборотов электродвигателя, *об/мин*.

Чтобы не допустить снижения номинального вращающего момента при переходе на другую скорость вращения и повысить пересчитанную на новую скорость вращения мощность электродвигателя, целесообразно применить провод с более тонкой и более нагревостойкой изоляцией.

При увеличении скорости вращения электродвигателя нагрев подшипников увеличивается, а при уменьшении скорости вращения он уменьшается. Следовательно, при увеличении скорости вращения электродвигателя потребуется усилить контроль за температурой подшипников.

При переходе на бо́льшую скорость вращения необходимо проверить окружную скорость ротора по формуле

$$v_р = \frac{\pi D_2 n}{60 \cdot 1\,000} \text{ м/сек}, \tag{36}$$

где $v_р$ — окружная скорость ротора, *м/сек*;
D_2 — диаметр ротора.

Окружная скорость фазного ротора не должна превышать 30—40 *м/сек*, а короткозамкнутого — 40—60 *м/сек*.

При переходе на бо́льшую скорость вращения необходимо усилить бандаж фазного ротора.

При перемотке обмоток электродвигателя на бо́льшую скорость вращения увеличивается шаг обмотки, что способствует увеличению длины вылета лобовых частей. Поэтому следует проверить, особенно при переходе на 3000 *об/мин*, допускает ли глубина подшипниковых щитов размещение удлиненных лобовых частей обмотки статора. В противном случае можно взять укорочение обмотки по пазам, большее, чем 0,8 *y*, и не ниже 0,7 *y*.

16. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЗАМЕНЕ МАТЕРИАЛА ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА

При ремонте электродвигателей иногда приходится производить замену материала обмоточных проводов, например вместо медных проводов применять алюминиевые и наоборот.

Удельное электрическое сопротивление алюминиевых проводов больше медных в 1,63 раза ($\rho_{мед} = 0{,}0175$; $\rho_{ал} = 0{,}0285$ *ом·мм²/м*).

Поэтому замена медного провода алюминиевым того же сечения приведет или к снижению мощности электродвигателя в 1,63 раза, или при сохранении мощности к увеличению потерь в обмотке статора электродвигателя более чем на 63%, что снизит к. п. д. электродвигателя, увеличит нагрев обмотки и сократит срок его службы.

Чтобы избежать указанных выше нежелательных последствий, следует максимально увеличить сечение алюминиевого провода за счет:

применения более тонкой изоляции проводов и изоляции паза;

повышения коэффициента заполнения паза статора;

выполнения обмотки в один провод вместо двух параллельных проводов и повышения магнитных нагрузок, если расчетом будет установлено, что они занижены.

Проведенные некоторыми заводами и научно-исследовательскими институтами исследовательские работы подтвердили возможность замены медных обмоточных проводов алюминиевыми даже без снижения мощности для некоторых старых типов электродвигателей и единой серии (А и АО) мощностью до 100 *квт*. Для замены

провода в каждом отдельном случае необходимо проводить пересчет электродвигателя по следующему методу:

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель для замены медного провода алюминиевым.

Технические данные электродвигателя и данные замеров:

Тип электродвигателя	А51-4
Мощность	$P = 4{,}5$ *квт*
Напряжение	$U = 220/380$ *в*
Ток	$I = 16{,}3/9{,}4$ *а*
Скорость вращения	$n = 1\,500$ *об/мин*
Внутренний диаметр статора	$D_в = 152$ *мм*
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов)	$L = 90$ *мм*
Число пазов статора	$z = 36$
Ширина зубца статора	$b_z = 7$ *мм*
Высота спинки статора	$h_c = 24{,}5$ *мм*
Число эффективных проводов в пазу	$N_п = 32$
Провод ПЭЛБО ∅ 1,62 в один провод, обмотка однослойная без параллельных ветвей, сечение эффективного провода	$F = 2{,}06$ *мм²*

Ротор—короткозамкнутый.

Вычисляют плотность тока в обмотке статора при медном проводе:

$$\Delta_м = \frac{I}{F} = \frac{9{,}4}{2{,}06} = 4{,}56 \ а/мм^2.$$

Вычисляют равноценную по нагреву плотность тока для алюминиевых проводов:

$$\Delta_{ал} = \Delta_м \frac{\rho_м}{\rho_{ал}} = 4{,}56 \frac{0{,}0175}{0{,}0285} = 2{,}81 \ а/мм^2.$$

Вычисляют магнитные нагрузки:

$$B_в = \frac{C \cdot 10^6}{D_в L N_п} = \frac{31{,}8 \cdot 10^6}{15{,}2 \cdot 9{,}0 \cdot 32} = 7\,300 \ гс;$$

$$B_z = 3{,}5 \frac{B_в D_в}{z b_z} = 3{,}5 \frac{7\,300 \cdot 15{,}2}{36 \cdot 0{,}7} = 15\,500 \ гс;$$

$$B_a = 0{,}6 \frac{B_в D_в}{p h_c} = 0{,}6 \frac{7\,300 \cdot 15{,}2}{2 \cdot 2{,}45} = 13\,600 \ гс.$$

Таким образом, увеличивать сечение алюминиевого провода за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазу и соответствующего увеличения магнитных нагрузок нецелесообразно.

Вычисляют коэффициент заполнения паза статора.

Площадь паза замеренная или по каталогу

$$S_п = 206{,}5 \ мм^2.$$

Диаметр медного провода с изоляцией

$$d_{из} = d + \delta_{из} = 1,62 + 0,21 = 1,83 \text{ мм}.$$

Сечение эффективиого провода с изоляцией

$$F_{из} = \frac{\pi d_{из}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,83^2}{4} = 2,64 \text{ мм}^2.$$

Сечеиие всех эффективных проводов с изоляцией

$$F_{из} N_п = 2,64 \cdot 32 = 84,5 \text{ мм}^2.$$

Коэффициеит заполнения паза

$$k_п = \frac{F_{из} N_п}{S_п} = \frac{84,5}{206,5} = 0,41.$$

Таким образом, коэффициент заполнеиия паза можно увеличить за счет лучшего использованся паза и меньшей жесткости алюминиевых проводов по сравнению с медными. Возьмем $k'_п = 0,45$.

Пересчитывают сечеиие эффективного провода с изоляцией, учитывая новый коэффициент заполнения паза:

$$F'_{из} = F_{из} \frac{k'_п}{k_п} = 2,64 \frac{0,45}{0,41} = 2,9 \text{ мм}^2,$$

что соответствует диаметру $d'_{из} = 1,95$ *мм.*

Выбирают марку и диаметр алюминиевого провода: берут алюминиевый провод марки ПЭВА-2, диаметром $d' = 1,88$ *мм* с изоляцией $\delta_{из} = 0,08$ *мм.*

Сечение провода $F' = 2,78$ *мм*^{2}.

Примечание. При выборе диаметра изолированного провода необходимо учитывать ширину шлица паза.

Вычисляют ток, исходя из сечения алюминиевого провода и вычисленной раиее плотности тока для алюминиевого провода:

$$I' = \Delta_{ал} F' = 2,81 \cdot 2,78 = 7,8 \text{ а}.$$

Вычисляют величину новой мощности электродвигателя:

$$P' = P \frac{I'}{I} = 4,5 \frac{7,8}{9,4} = 3,73 \text{ квт}.$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшена мощность электродвигателя при переходе на алюминиевый обмоточный провод:

$$\frac{P'}{P} = \frac{4,5}{3,73} = 1,205, \text{ т. е. иа } 20,5\%.$$

Учитывая, что в данном примере применена изоляция провода типа винифлекс, относящаяся по нагревостойкости к классу Е,

для которой допустимое превышение температуры составляет 85° С, следует считать возможным повысить плотность тока в обмотке статора данного электродвигателя на 20%, установив его номинальную мощность 4,5 *квт*.

Пересчитанный электродвигатель в связи с заменой медиого обмоточного провода алюминиевым может работать при мощности 4,5 *квт;* при этом незначительно возрастут его потери из-за увеличения нагрева обмотки статора и соответственно иесколько снизится к. п. д.

17. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Пример. Требуется произвести сокращенный расчет обмотки статора электродвигателя с к. з. ротором, не имеющего технического паспорта обмотки.

Данные электродвигателя:

Скорость вращения $n=1\,500$ *об/мин*;

напряжение U — 220/380 *в*.

Результаты замеров:

внутренний диаметр статора $D_в=145$ *мм*;

длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) $L=200$ *мм*;

число пазов статора $z=36$;

ширина зубца статора (расчетная) $b_z=6{,}8$ *мм*;

высота спинки статора $h_c=28$ *мм*.

Примечания: 1. Замеры произведены в миллиметрах, а запись размеров в формулы для расчета производят в сантиметрах.

2. Измерение ширины зубца и спинки статора произведено с точностью до 0,1 *мм*.

Задаются максимальной магнитной индукцией в воздушном зазоре $B_в=6\,900$ *гс* и по табл. 5 постоянных коэффициентов для $2p=4$ и $z=36$ пазов определяют величину C и число эффективных проводов в пазу статора:

$$N_п=\frac{C\cdot 10^6}{D_в L B_в}=\frac{31{,}8\cdot 10^6}{14{,}5\cdot 20{,}0\cdot 6\,900}=15{,}9.$$

Число эффективных проводов в пазу статора принимается $N_п=16$, а величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не меняют в связи с небольшой разницей между взятыми эффективными проводами в пазу и полученными расчетами.

Определяют магнитную индукцию в зубце статора:

$$B_z=3{,}5\frac{B_в D_в}{z b_z}=3{,}5\frac{6\,900\cdot 14{,}5}{36\cdot 0{,}68}=14\,200 \text{ гс}.$$

Определяют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_a=0{,}6\frac{B_в D_в}{p h_c}=0{,}6\frac{6\,900\cdot 14{,}5}{2\cdot 2{,}8}=10\,700 \text{ гс}.$$

Сравнивая полученные магнитные индукции с допустимыми по табл. 4, видно, что число эффективных проводов в пазу можно уменьшить и этим увеличить индукцию.

Окончательно число эффективных проводов в пазу принимают $N_п=15$ и пересчитывают магнитные индукции:

$$B_в = \frac{6\,900 \cdot 16}{15} = 7\,400 \ гс;$$

$$B_z = \frac{14\,200 \cdot 16}{15} = 15\,200 \ гс;$$

$$B_a = \frac{10\,700 \cdot 16}{15} = 11\,400 \ гс.$$

По оттиску паза определяют сечение паза $s_п$, задаются коэффициентом заполнения паза $k_п$ и определяют сечение одного эффективного провода с изоляцией:

$$s_п = 125 \ мм^2.$$

Для трапециевидного паза и однослойной обмотки

$$k_п = 0{,}41;$$

$$F_{из} = \frac{k_п s_п}{N_п} = \frac{0{,}41 \cdot 125}{15} = 3{,}42 \ мм^2.$$

Определяют сечение одного элементарного провода с изоляцией, приняв число параллельных ветвей $a=1$ и число параллельных проводов $b=2$:

$$s_{1из} = \frac{F_{из}}{ab} = \frac{3{,}42}{1 \cdot 2} = 1{,}71 \ мм^2.$$

Определяют диаметр одного элементарного провода с изоляцией по переводной таблице или вычислением:

$$d_{из} = 1{,}47 \ мм.$$

Определяют диаметр голого провода марки ПЭЛБО:

$$d = d_{из} - \delta_{из} = 1{,}47 - 0{,}21 = 1{,}26 \ мм,$$

а по ГОСТ $d = 1{,}25$ *мм*, что соответствует сечению $s_1 = 1{,}23$ *мм*^{2}.

Задаются плотностью тока для медных проводов $\Delta = 6$ *а/мм*^{2} и вычисляют фазный ток электродвигателя:

$$I_ф = \Delta b s_1 = 6 \cdot 2 \cdot 1{,}23 = 14{,}7 \ а.$$

По приложению 2 выбирают к. п. д. и $\cos\varphi$, где для 6—8 *квт* электродвигателя к. п. д.$=0{,}86$, $\cos\varphi=0{,}87$ и мощность равна будет:

$$P = \frac{3U_ф I_ф \cos\varphi\eta}{1\,000} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 14{,}7 \cdot 0{,}86 \cdot 0{,}87}{1\,000} = 7{,}3 \ квт.$$

Пример. Произвести сокращенный расчет обмотки статора электродвигателя, поступившего в ремонт без технического паспорта и обмотки (ротор короткозамкнутый).

Требуемые данные электродвигателя:

Напряжение $U=220/380$ *в*;

число оборотов — возможно максимальное.

Данные замеров:

внутренний диаметр статора $D_в=218$ *мм*;

длина активной стали статора без вентиляционных каналов $L=180$ *мм*;

число пазов статора $z=48$;

ширина зубца статора $b_z=6{,}2$ *мм*;

высота спинки статора $h_c=33$ *мм*.

Определяют наименьшее допустимое число полюсов:

$$2p = 0{,}5\frac{D_в}{h_c} = 0{,}5\ \frac{21{,}8}{3{,}3} = 3{,}3 \approx 4.$$

Задаются максимальной магнитной индукцией в воздушном зазоре $B_в=7\,200$ *гс*, а по табл. 5 для $2p=4$ и $z=48$ определяют величину C, после чего — число эффективных проводов в пазу статора:

$$N_п = \frac{C\cdot 10^6}{D_в L B_в} = \frac{23{,}8\cdot 10^6}{21{,}8\cdot 18{,}0\cdot 7\,200} = 8{,}45 \approx 8{,}5;$$

$N_п$ принимают равным 8,5, имея в виду выполнение обмотки с параллельными ветвями.

Определяют магнитную индукцию в зубце статора:

$$B_z = 3{,}5\frac{B_в D_в}{z b_z} = 3{,}5\ \frac{7\,200\cdot 21{,}8}{48\cdot 0{,}62} = 18\,500\ гс.$$

Определяют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_а = 0{,}6\frac{B_в D_в}{p h_c} = 0{,}6\cdot\frac{7\,200\cdot 21{,}8}{2\cdot 3{,}3} = 14\,300\ гс.$$

Так как индукция в зубце статора выше допустимых (см. табл. 4), число эффективных проводов в пазу следует увеличить. Принимается $N_п=9{,}5$, и тогда магнитные индукции:

$$B_в = \frac{7\,200\cdot 8{,}5}{9{,}5} = 6\,400\ гс;$$

$$B_z = \frac{18\,500\cdot 8{,}5}{9{,}5} = 16\,500\ гс;$$

$$B_а = \frac{14\,300\cdot 8{,}5}{9{,}5} = 12\,800\ гс.$$

По оттиску паза определяют его площадь $S_п$ и задаются коэффициентом заполнения паза $k_п$, после чего вычисляют сечение одного эффективного провода с изоляцией.

Площадь паза $S_п=212$ *мм²*.

Для трапециевидного паза и двухслойной обмотки коэффициент заполнения паза $k_п=0{,}40$.

Сечение одного эффективного провода с изоляцией будет:

$$F_{из}=\frac{k_п S_п}{N_п}=\frac{0{,}40\cdot 212}{9{,}5}=8{,}92\ мм^2.$$

Определяют сечение одного элементарного провода с изоляцией, приняв число параллельных проводов $b=1$ и число параллельных ветвей $a=4$:

$$s_{1из}=\frac{F_{из}}{ab}=\frac{8{,}92}{4\cdot 1}=2{,}23\ мм^2.$$

Данному сечению соответствует диаметр $d_{из}=1{,}68$ *мм*.

Определяют диаметр голого провода марки ПЭВ-2:

$$d=d_{из}-\delta_{из}=1{,}68-0{,}12=1{,}56\ мм.$$

Сечение голого провода равно $s_1=1{,}911$ *мм²*.

Задаются плотностью тока для медных проводов $\Delta=5{,}5$ *а/мм²* и вычисляют фазный ток электродвигателя:

$$I_ф=\Delta a s_1=5{,}5\cdot 4\cdot 1{,}911=42{,}2 а.$$

По приложению 5 выбирают величину к. п. д. и косинус φ, равные: к. п. д.=0,89; $\cos\varphi=0{,}88$ и определяют мощность:

$$P=\frac{3U_ф I_ф \cos\varphi\eta}{1\,000}=\frac{3\cdot 220\cdot 42{,}2\cdot 0{,}88\cdot 0{,}89}{1\,000}=21{,}8\ квт.$$

Пример. Произвести поверочный расчет обмотки статора электродвигателя со следующими техническими данными: мощность 9,6 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 34,3/19,8 *а*; скорость вращения 1 000 об/*мин*; ротор — короткозамкнутый.

Данные замеров:

внутренний диаметр статора $D_в=230$ *мм*;

длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) $L=156$ *мм*;

число пазов статора $z=54$;

ширина зубца статора $b_z=5{,}2$ *мм*;

высота спинки статора $h_c=21$ *мм*;

число элементарных проводов в пазу $N=32$.

Провод ПБД ∅ 1,74 *мм* параллельно в два провода. Шаг по пазам $y=1$—9, обмотка — двухслойная.

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_в=\frac{C\cdot 10^6}{D_в L N_п}=\frac{31{,}8\cdot 10^6}{23{,}0\cdot 15{,}6\cdot 16}=5\,500\ гс.$$

Так как элементарных проводов в пазу было 32, число эффективных проводов в пазу $N_п=16$, так как обмотка выполнена в два

параллельных провода без параллельных ветвей (прн налнчни, например, трех параллельных ветвей и двух параллельных проводов число эффективных проводов в пазу было бы $\frac{32}{3 \cdot 2}=5{,}33$).

Магнитная индукция в зубце статора

$$B_z = 3{,}5 \frac{B_в D_в}{z b_z} = 3{,}5 \frac{5\,500 \cdot 23}{54 \cdot 0{,}52} = 15\,800 \text{ гс}.$$

Магнитная индукция в спинке статора

$$B_a = 0{,}6 \frac{B_в D_в}{p h_c} = 0{,}6 \frac{5\,500 \cdot 23}{3 \cdot 2{,}1} = 12\,100 \text{ гс}.$$

Плотность тока в обмотке статора

$$\Delta = \frac{I_ф}{a b s_1} = \frac{19{,}8}{1 \cdot 2 \cdot 2{,}378} = 4{,}2 \text{ а/мм}^2,$$

где $I_ф$ — фазный ток обмоткн статора, равный прн соединенин звездой линейиому току;

a — число параллельных ветвей в обмотке статора;

b — число параллельных проводов в обмотке статора;

s_1 — сечение элементарного провода обмотки статора.

Так как магнитные индукции и плотность тока здесь не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 4 и 6), число эффективных проводов в пазу обмоткн статора н диаметр провода соответствуют данным этого электродвигателя.

Пример. Требуется перемотать электродвигатель с напряженни 127/220 на 220/380 *в*.

Данные электродвигателя: Мощность 37 *квт;* наприжение 127/220 *в*; ток 230/133 *а*; скорость вращения 750 *об/мин;* ротор — фазный; обмотки статора и ротора соединены звездой.

Данные замеров:

внутренний диаметр статора $D_в=365$ *мм*;

длина актнвной стали статора (без вентиляцнонных каналов) $L=210$ *мм*;

число пазов статора $z=72$;

число элементарных проводов в пазу $N=21$;

число параллельных ветвей $a=2$;

провод — ПБД ∅ 2,63 *мм*; сечение $s_1=5{,}432$ *мм*^{2};

число параллельных проводов $b=3$;

шаг по пазам 1—10; обмотка — однослойная.

Число эффективных проводов в пазу обмотки статора

$$N_{п.ст} = \frac{N}{ab} = \frac{21}{2 \cdot 3} = 3{,}5.$$

Необходимое число эффективных проводов в пазу обмотки статора прн напряжении 220/380 *в*

$$N_{п.нов} = N_{п.ст} \frac{U_{ф.нов}}{U_{ф.ст}} = 3{,}5 \cdot \frac{220}{127} = 6{,}1.$$

Сечение эффективного провода обмотки статора при напряжении 127/220 *в*

$$F_{ст} = s_{1ст.ab} = 5{,}432 \cdot 2 \cdot 3 = 32{,}5 \text{ мм}^2.$$

Необходимое сечение эффективного провода при напряжении 220/380 *в*

$$F_{нов} = F_{ст}\frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = 32{,}5 \cdot \frac{127}{220} = 18{,}8 \text{ мм}^2.$$

Сечение элементарного провода при четырех параллельных ветвях и выполнении обмотки в один провод

$$s_{1нов}\frac{F_{нов}}{ab} = \frac{18{,}8}{4 \cdot 1} = 4{,}7 \text{ мм}^2$$

По сечению находят диаметр провода $\varnothing = 2{,}44$ *мм*, что соответствует сечению $s_1 = 4{,}676$ *мм*^{2}.

Ток при напряжении 220/380 *в*

$$I_{фнов} = I_{ф.ст}\frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = 133\,\frac{127}{220} = 76{,}5 \text{ а}.$$

Число элементарных проводов в пазу статора при напряжении 220/380 *в*

$$N_{нов} = N_{п.нов}\,ab = 6{,}1 \cdot 4 \cdot 1 = 24{,}4.$$

Принимается $N_{нов} = 25$; тогда $N_{п.нов} = \frac{25}{4 \cdot 1} = 6{,}25.$

В целях проверки подсчитывают:

величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_в = \frac{C \cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{31{,}8 \cdot 10^6}{36{,}5 \cdot 21 \cdot 6{,}25} = 6\,650 \text{ гс};$$

плотность тока в обмотке статора

$$\Delta = \frac{I_{ф.нов}}{s_{1нов}\,ab} = \frac{76{,}5}{4{,}676 \cdot 4 \cdot 1} = 4{,}1 \text{ а}.$$

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке статора не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 4 и 6).

Обмотку ротора при пересчете электродвигателя на новое напряжение не меняют, так как напряжение на кольцах ротора и фазный ток при этом остаются прежними.

Пример. Электродвигатель имеет следующие технические данные: мощность 3,6 *квт;* напряжение 380 *в*; соединение обмотки статора Δ; ток 8,4 *а*; скорость вращения 1 000 *об/мин*. Требуется

пересчитать его на напряжение 500 *в* при соединении обмотки $\curlywedge$ Ротор — короткозамкнутый.

Данные замеров:

внутренний диаметр статора $D_в = 160$ *мм;*

длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) $L = 110$ *мм*;

число пазов статора $z = 36$;

число элементарных проводов в пазу $N = 60$;

провод — ПЭЛБО ∅ 1,04 *мм*, сечение провода $s_1 = 0{,}85$ *мм*²; обмотка без параллельных ветвей и параллельных проводов ($N_п = N$); шаг по пазам 1—6; обмотка — однослойная.

Требуемое число эффективных проводов в пазу статора при замене напряжения с 380 на 500 *в* и замене соединения обмотки статора с Δ на $\curlywedge$

$$N_{п.нов} = N_{п.ст}\frac{U_{ф.нов}}{U_{ф.ст}} = 60\cdot\frac{290}{380} = 45{,}7 \approx 46.$$

$$\text{Здесь } U_{ф.нов} = \frac{500}{\sqrt{3}} = \frac{500}{1{,}73} = 290 \text{ в}.$$

Требуемое сечение провода при замене напряжения с 380 на 500 *в*

$$s_{1\,нов} = s_{1\,ст}\frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = 0{,}85\frac{380}{290} = 1{,}11 \text{ мм}^2.$$

Принимают $s_{1нов} = 1{,}131$ *мм*², что соответствует ∅ 1,20 *мм*.

Ток при напряжении 500 *в*

$$I_{ф.нов} = I_{ф.ст}\frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = \frac{I_{л.ст}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{U_{ф.ст}}{U_{ф.нов}} = \frac{8{,}4}{1{,}73}\cdot\frac{380}{290} = 6{,}4 \text{ а}.$$

Для проверки подсчитывают величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_в = \frac{C\cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{47{,}6\cdot 290\cdot 10^6}{220\cdot 16\cdot 11\cdot 46} = 7\,800 \text{ гс}.$$

Здесь произведен пересчет постоянного коэффициента на фазное напряжение 290 *в*, так как величина коэффициента подсчитана для наиболее часто встречающегося фазного напряжения 220 *в*.

Плотность тока в обмотке статора

$$\Delta = \frac{I_{ф.нов}}{s_{1\,нов\,ab}} = \frac{6{,}4}{1{,}131\cdot 1\cdot 1} = 5{,}65 \text{ а/мм}^2.$$

Результаты проверки показывают правильность старой обмотки, данные которой взяты в основу при пересчете на новое напряжение. В противном случае следовало бы сделать дополнительные замеры ширины зубца и высоты спинки статора и подсчитать магнитные индукции в зубце и спинке статора. При значительных отклонениях магнитных индукций от нормальных величин необходимо корректировать число эффективных проводов в пазу и сечение про-

вода обмотки статора, дабы магнитные индукции и плотность тока не выходили за пределы допустимых величин.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель типа АО51-4 на 3 000 *об/мин*.

Технические данные:

Мощность 4,5 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 16,1/9,3 *а*; скорость вращения 1 500 *об/мин*; ротор — короткозамкнутый.

Данные замеров:

внутренний диаметр статора $D_в = 152$ *мм*;

диаметр ротора $D_2 = 151{,}2$ *мм*;

длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) $L = 90$ *мм*;

число пазов статора $z = 36$;

ширина зубца статора $b_z = 7$ *мм*;

высота спинки статора $h_c = 24{,}5$ *мм*;

число элементарных проводов в пазу $N = 64$.

Провод — ПЭЛБО ∅ 1,16 *мм*; параллельных ветвей нет; параллельных проводов — 2 (следовательно, $N_п = 32$).

Шаг по пазам 1—10; обмотка — однослойная.

Определяют наименьшее число полюсов, допустимое для данного электродвигателя:

$$2_p = 0{,}5\,\frac{D_в}{h_c} = 0{,}5\,\frac{15{,}2}{2{,}45} = 3{,}1.$$

Ближайшее четное число 4 и, если пренебречь 0,1, также 2. Следовательно, конструкция электродвигателя позволяет изменить скорость вращения с 1 500 на 3 000 *об/мин*.

Определяют число эффективных проводов в пазу при переходе на новую скорость вращения:

$$N_{п.нов} = N_{п.ст}\,\frac{n_{ст}}{n_{нов}} = 32\,\frac{1\,500}{3\,000} = 16.$$

Вычисляют величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_в = \frac{C \cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{15{,}9 \cdot 10^6}{15{,}2 \cdot 9 \cdot 16} = 7\,300\ гс$$

Вычисляют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_a = 0{,}6\,\frac{B_в D_в}{p h_c} = 0{,}6\,\frac{7\,300 \cdot 15{,}2}{1 \cdot 24{,}5} = 27\,000\ гс.$$

Так как индукция в спинке статора слишком велика, следует число эффективных проводов в пазу увеличить.

Величина магнитной индукции в спинке статора принимается $B_a = 16\,500$ *гс* и окончательно определяют число эффективных проводов в пазу:

$$N_{п.нов} = 16 \cdot \frac{27\,000}{16\,500} = 26.$$

Пересчитывают соответственно и величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_в = 7\,300 \frac{16}{26} = 4\,500 \text{ гс}.$$

Определяют сечение элементарного провода при переходе с 32 эффективных проводов в пазу (при $n=1\,500$ *об/мин*) на 26: сечение элементарного провода при

$n=1\,500$ *об/мин* $s_1=1{,}057$ *мм*^{2}.

Сечение эффективного провода

$$F_{ст} - s_1 \ ab = 1{,}057 \cdot 1 \cdot 2 = 2{,}114 \text{ мм}^2.$$

Новое сечение эффективного провода

$$F_{нов} = F_{ст} \frac{N_{п.ст}}{N_{п\,нов}} = 2{,}114 \frac{32}{26} = 2{,}6 \text{ мм}^2.$$

Принимаем число параллельных проводов $b=2$; определяют сечение элементарного провода при $n=3\,000$ *об/мин*:

$$s_{1нов} = \frac{F_{нов}}{ab} = \frac{2{,}6}{1 \cdot 2} = 1{,}3 \text{ мм}^2$$

Принимается провод ПЭЛБО ⌀ 1,30; $s_{1нов}=1{,}327$ *мм*^{2}.
Число элементарных проводов в пазу
$N_{нов}=N_{п.нов}\ ab=26 \cdot 1 \cdot 2=52$.

Определяют плотность тока в обмотке статора при $n=1\,500$ *об/мин*:

$$\Delta_{ст} = \frac{I_{ф.ст}}{F_{ст}} = \frac{9{,}3}{2{,}114} = 4{,}42 \text{ а/мм}^2.$$

Определяют фазный ток при плотности тока $\Delta_{нов}=5{,}1$ *а/мм*^{2} с учетом улучшения охлаждения при переходе с 1 500 на 3 000 *об/мин*:

$I_{ф.нов}=\Delta_{нов}\ s_{1нов}\ ab=5{,}1 \cdot 1{,}327 \cdot 1 \cdot 2=13{,}5$ *а*.

Определяют новую мощность электродвигателя, приняв к. п. д. и $\cos \varphi$ равными старым величинам:

$$P_{нов} = P_{ст} \frac{I_{ф.нов}}{I_{ф.ст}} = 4{,}5 \frac{13{,}5}{9{,}3} \approx 6{,}5 \text{ квт}.$$

Вычисляют номинальный момент вращения на валу при старой и новой скорости вращения:

$$M_{ст} = 975 \frac{P_{ст}}{n_{ст}} = 975 \frac{4{,}5}{1\,500} = 2{,}92 \text{ кГ}\cdot\text{м};$$

$$M_{нов} = 975 \frac{P_{нов}}{n_{нов}} = 975 \frac{6{,}5}{3\,000} = 2{,}11 \text{ кГ}\cdot\text{м}.$$

Определяют, во сколько раз новый вращающий момент меньше старого:

$$\frac{M_{\text{ст}}}{M_{\text{нов}}} = \frac{2,92}{2,11} = 1,38 \text{ раза.}$$

Вычисляют окружную скорость ротора:

$$V_{\text{р}} = \frac{\pi D_2 n_{\text{нов}}}{60 \cdot 1\,000} = \frac{3,14 \cdot 151,2 \cdot 3\,000}{60 \cdot 1\,000} = 23,8 \text{ м/сек},$$

что находится в пределах допустимого.

Обмотку выполняют двухслойной с шагом 1—13, двумя катушечными группами в фазе и при шести катушках в группе.

Пример. Пересчитать электродвигатель с фазным ротором с 1 500 на 750 *об/мин*. Технические данные электродвигателя типа Т; мощность 29 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 97/56 *а*; скорость вращения $n = 1\,500$ *об мин*; напряжение на кольцах ротора $U_{\text{лин2}} = 290$ *в*; соединение обмотки ротора λ.

Данные замеров:

внутренний диаметр статора $D_{\text{в}} = 220$ *мм*;

диаметр ротора $D_2 = 218,8$ *мм*;

длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) $L = 245$ *мм*;

число пазов ротора $z_2 = 48$;

число пазов статора $z_1 = 36$;

число элементарных проводов в пазу $N_1 = 34$.

Провод ПБД ∅ 1,81 *мм* параллельно в два, две параллельные ветви. Обмотка статора — однослойная катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1—8; 1—10; 1—12. Обмотка ротора — катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1—10; 1—12; 1—14; 1—16. Число элементарных проводов в пазу $N_2 = 5$. Провод ПБД ∅ 3,53 *мм*; обмотка выполнена в один провод без параллельных ветвей; $s_{1,2} = 9,787$ *мм*²; $N_{\text{п2}} = 5$; соединение обмотки ротора λ.

Число эффективных проводов в пазу статора при $n = 1\,500$ *об/мин*

$$N_{\text{п1ст}} = \frac{N_1}{ab} = \frac{34}{2 \cdot 2} = 8,5.$$

Число эффективных проводов в пазу статора при переходе на новую скорость вращения

$$N_{\text{п1нов}} = N_{\text{п1ст}} \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{нов}}} = 8,5 \frac{1\,500}{750} = 17.$$

Новое сечение провода обмотки статора:

сечение элементарного провода при $n = 1\,500$ *об/мин* $s_1 = 2,573$ *мм*².

Сечение эффективного провода $F_{\text{ст}} = s_1\, ab = 2,573 \cdot 2 \cdot 2 = 10,3$ *мм*².

Новое сечение эффективного провода

$$F_{\text{нов}} = F_{\text{ст}} \frac{N_{\text{п1ст}}}{N_{\text{п1нов}}} = 10,3 \frac{8,5}{17} = 5,15 \text{ мм}^2.$$

Принимается число параллельных проводов $b_{нов}=2$, а число параллельных ветвей $a_{нов}=2$; тогда число элементарных проводов в пазу статора

$$N_п = N_{п1нов}\, ab = 17\cdot 2\cdot 2 = 68.$$

Сечение элементарного провода

$$s_{1нов} = \frac{F_{нов}}{a_{нов}\, b_{нов}} = \frac{5,15}{2\cdot 2} = 1,29\ мм^2.$$

Принимается провод ПЭЛБО ∅ 1,25 *мм*; $s_{1нов}=1,23$ $мм^2$. Пересчитывают величину сечения эффективного провода:

$$F_{нов} = s_{1\,нов}\, ab = 1,23\cdot 2\cdot 2 = 4,92\ мм^2.$$

Мощность электродвигателя при $n=750$ *об/мин* без учета изменении к. п. д. и $\cos\varphi$.

$$P'_{нов} = P_{ст}\frac{n_{нов}}{n_{ст}} = 29\,\frac{750}{1\,500} = 14,5\ квт.$$

Учитывая ухудшение охлаждения при переходе на меньшую скорость вращения, мощность электродвигателя следует уменьшить на 10%:

$$P''_{нов} = 0,9\,P'_{нов} = 0,9\cdot 14,5 = 13\ квт.$$

По приложению 6 находят к. п. д. и $\cos\varphi$, где для $P=29$ *квт* и $n=1\,500$ *об/мин* $\eta=0,90$ и $\cos\varphi=0,88$, а дли $P=13$ *квт* и $n=750$ *об/мин* $\eta=0,87$ и $\cos\varphi=0,81$.

Определяют мощность электродвигателя:

$$P_{нов} = 0,9\,P_{ст}\,\frac{n_{нов}\,\eta_{нов}\cos\varphi_{нов}}{n_{ст}\,\eta_{ст}\cos\varphi_{ст}} = 0,9\cdot 29\times$$

$$\times\frac{750\cdot 0,87\cdot 0,81}{1\,500\cdot 0,90\cdot 0,88} \approx 12\ квт.$$

Проверяют:

плотность тока в обмотке статора

$$I_{ф1нов} = \frac{P_{нов}\cdot 10^3}{3U_ф\eta_{нов}\cos\varphi_{нов}} = \frac{12\cdot 10^3}{3\cdot 220\cdot 0,87\cdot 0,81} = 25,9\ а;$$

$$\Delta_{нов} = \frac{I_{ф1нов}}{F_{нов}} = \frac{25,9}{4,92} = 5,26\ а/мм^2;$$

максимальную индукцию в воздушном зазоре при $n=750$ *об/мин*

$$B_в = \frac{C\cdot 10^6}{D_в L N_{п.нов}} = \frac{63,6\cdot 10^6}{22\cdot 24,5\cdot 17} = 7\,000\ гс.$$

Магнитную индукцию в зубце статора не подсчитывают, так как при переходе с 1 500 на 750 *об/мин* она не изменится, ибо макси-

мальная магнитная индукция в воздушном зазоре не изменилась (уменьшили скорость вращения в 2 раза и увеличили число эффективных проводов в пазу тоже в 2 раза).

Обмотка статора двухслойная с шагом по пазам 1—5. В фазе четыре катушечные группы по одной катушке и четыре по две катушки в группе.

Определяют число эффективных витков в фазе обмотки ротора при $n=750$ об/*мин.* Напряжение на кольцах ротора оставляют прежним, т. е.

$$U_{\text{мин}2} = 290 \ в;$$

$$w_{2\,\text{нов}} = \frac{w_{1\text{нов}} U_{\text{ф}2}}{U_{\text{ф}1}} \text{ витков.}$$

Предварительно вычислим число эффективных витков в фазе обмотки статора:

$$w_{1\text{нов}} = \frac{N_{\text{п}1\text{нов}}\, z_1}{2m_1} = \frac{N_{\text{п}1\text{нов}}\, z_1}{6} = \frac{17 \cdot 36}{6} = 102 \text{ витка.}$$

Число эффективных витков в фазе обмотки ротора

$$w_{2\text{нов}} = \frac{102 \cdot 290}{220\sqrt{3}} = 78 \text{ витков}$$

$$\left(U_{\text{ф}2} = \frac{U_{\text{лин}2}}{\sqrt{3}}, \text{ так как обмотка соединена в } \lambda\right).$$

Число эффективных проводов в пазу ротора

$$N_{\text{п}2\text{нов}} = \frac{2m_2 w_{2\text{нов}}}{z_2} = \frac{6 \cdot w_{2\text{нов}}}{z_2} = \frac{6 \cdot 78}{48} = 9{,}75.$$

Принимая $N_{\text{п}2\text{нов}} = 10$, пересчитывают:

число эффективных витков в фазе обмотки ротора

$$w_{2\text{нов}} = 78 \cdot \frac{10}{9{,}75} = 80;$$

Линейное напряжение на кольцах ротора

$$U_{\text{лин}2} = 290 \frac{80}{78} = 297 \ в.$$

Определяют ток ротора

$$I_{\text{ф}2\text{нов}} = (0{,}9 \div 0{,}85)\, I_{\text{ф}1\text{нов}} \frac{w_{1\text{нов}}}{w_{2\text{нов}}} = 0{,}9 \cdot 25{,}5 \frac{102}{80} = 29{,}2a.$$

Определяют сечение эффективного провода обмотки ротора при $N_{п2нов}=10$:

$$F_{2нов} = F_{2ст}\frac{N_{п2ст}}{N_{п2нов}} = s_{1ст}\,a_{ст}\,b_{ст}\frac{N_{п2ст}}{N_{п2нов}} =$$

$$= 9{,}787\cdot 1\cdot 1\,\frac{5}{10} = 4{,}89\ мм^2.$$

Принимается провод ПБД ∅ 1,74 *мм* (сечение $s_{1,2нов} = 2{,}378\ мм^2$; обмотку выполняют с двумя параллельными ветвями в один провод ($N_{2\,нов}=2N_{п2\,нов}$). Проверяют заполнение паза ротора вычислением коэффициента заполнения паза и сравнением его с общепринятыми величинами или практическим заполнением паза проводом ∅ 1,74 *мм*.

Определяют плотность тока в обмотке ротора:

$$\Delta_{2\,нов} = \frac{I_{ф2нов}}{s_{1,2\,нов}\,a_{нов}\,b_{нов}} = \frac{29{,}2}{2{,}378\cdot 1\cdot 2} = 6{,}1\ а/мм^2,$$

что находится в пределах допустимого.

Обмотку ротора выполняют катушечной с шагом по пазам 1—6 и 1—8 с четырьмя катушечными группами в фазе, а в катушечной группе по две катушки.

Вычисляют номинальный момент вращения на валу электродвигателя при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{ст} = 975\frac{P_{ст}}{n_{ст}} = 975\frac{29}{1\,500} = 18{,}8\ кГ\cdot м.$$

$$M_{нов} = 975\frac{P_{нов}}{n_{нов}} = 975\frac{12}{750} = 15{,}6\ кГ\cdot м.$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшился номинальный вращающийся момент при переходе на новую скорость вращения:

$$\frac{M_{ст}}{M_{нов}} = \frac{18{,}8}{15{,}6} = 1{,}21\ раза.$$

18. ЗАМЕЧАНИЯ К РАСЧЕТАМ

После произведенного частичного ремонта или полной замены обмотки статора технические данные электродвигателя должны соответствовать данным обмоточно-расчетной карточки и, кроме того, отношение пускового и максимального моментов вращения к номиналь-

ному должно соответствовать ГОСТ. Поскольку измерение моментов вращения электродвигателей сопряжено с некоторыми трудностями, чаще всего о пригодности электродвигателя судят по величине тока холостого хода, который должен составлять определенный процент номинального тока для данной группы электродвигателей. В табл. 8 указаны допустимые величины тока холостого хода в процентах номинального в зависимости от мощности и числа оборотов электродвигателя.

Таблица 8

Допустимые величины тока холостого хода электродвигателей в процентах номинального

Мощность электродвигателя, *квт*	Скорость вращения электродвигателя, *об/мин*					
	3 000	1 500	1 000	750	600	500
0,1—0,5	60	75	85	90	95	—
0,51—1,0	50	70	75	80	85	90
1,1—5,0	45	65	70	75	80	85
5,1—10,0	40	60	65	70	75	80
10,1—25,0	30	55	60	65	70	75
25,1—50,0	20	50	55	60	65	70
50,1—100	—	40	45	50	55	60

Иногда бывает, что хотя обмотка статора выполнена по правильно произведенному расчету, но при испытании ток холостого хода завышен. Такое явление может быть объяснимо следующим.

Сердечник статора или ротора сдвинут с места, что уменьшает фактическую длину активной стали.

Активная сталь статора (ротора) или того и другого низкого качества. Для устранения этого дефекта обмотку статора следует перемотать с увеличением числа эффективных проводов в пазу при соответствующем снижении мощности.

Зазор между сердечником статора и сердечником ротора завышен из-за чрезмерной проточки ротора или длительного трения стали ротора о сталь статора. В таких случаях обмотку статора следует перемотать, увеличив число эффективных проводов в пазу, снизив при этом мощность. Бывают случаи, когда воздушный зазор

так велик, что может возникнуть вопрос о целесообразности перемотки статора из-за резкого снижения cos φ и чрезмерного нагрева. В таких случаях, если его все же ремонтируют, при пересчете мощность электродвигателя должна быть соответственно снижена.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. ВЫПОЛНЕНИЕ ОБМОТКИ РОТОРА

Технологический процесс выполнения обмоток можно разделить на следующие операции:

Подготовка статора (фазного ротора) к укладке катушек (секций).

Заготовка пазовой (корпусной) и междуфазной изоляции. Изолировка пазов и нажимных шайб.

Намотка катушек, катушечных групп или полностью фаз обмотки.

Укладка катушек в статор (ротор).

Соединение катушечных групп в фазе. Изолировка мест соединения катушечных групп. Бандажировка и придание формы лобовым частям.

Испытание обмотки.

19. ПОДГОТОВКА СТАТОРА К УКЛАДКЕ КАТУШЕК (СЕКЦИЙ)

После удаления из пазов статора старой обмотки с изоляцией статор очищают от грязи методом продувки сжатым воздухом, пылесосом или ручным мехом и проверяют правильность запрессовки сердечника в корпус, чистоту вентиляционных каналов, отсутствие трещин на станине и т. п.

При необходимости зубцы сердечника статора выравниваются, снимаются заусенцы, производится опиловка выступающих пластин в шлице и внутри паза, после чего статор вторично продувается сжатым воздухом и направляется на изолировку пазов.

Если на статоре имеются жирные пятна от смазочного или другого масла и другие загрязненные места до слесарной обработки статора, эти пятна следует снять ветошью, смоченной в керосине или бензине.

При сильно загрязненном статоре его следует обезжирить путем промывки в ванне, содержащей 5%-ный водный раствор каустической соды (NaOH), нагретый до температуры 50—60° С, или в растворах с другими обезжиривающими веществами, или в ванне с керосином. Обезжиренный статор вытирается насухо ветошью.

20. ЗАГОТОВКА ИЗОЛЯЦИИ. ИЗОЛИРОВКА ПАЗОВ СТАТОРА. ИЗОЛИРОВКА НАЖИМНЫХ ШАЙБ

Пазовой изоляцией для электродвигателей нормального исполнения мощностью до 100 *квт* и напряжением до 500 *в* обычно являются электрокартон (прессшпан) толщиной 0,1—0,3 *мм*, хлопчатобумажная или шелковая лакоткань, кабельная бумага и пленкокартон.

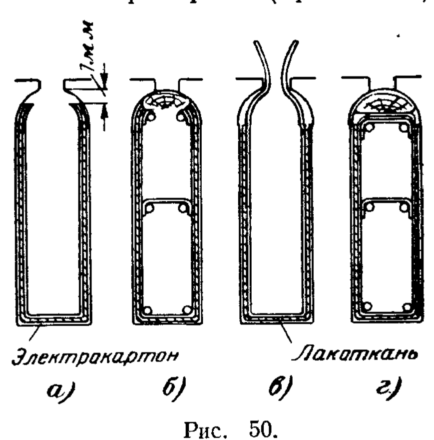


Рис. 50.

а — вид пазовой коробочки до укладки провода; *б* — то же после укладки провода; *в* — вид пазовой коробочки до укладки провода при разной ширине заготовок изоляции; *г* — то же после укладки провода.

Чаще всего пазовая изоляция (коробочка или гильза) изготовляется из двух слоев электрокартона и одного слоя лакоткани. Заготовку пазовой изоляции производят на рычажных ножницах, вмонтированных в стол, с направляющей и установочной линейкой и прижимной планкой. Ширина заготовок зависит от периметра паза и может быть одинаковой для всех трех слоев при форме коробочки по рис. 50,*а* и *б* или разной при форме коробочки по рис. 50,*в* и *г*. Заготовка коробочки по рис. 50,*в* и *г* для верхнего слоя производится из картона на 20 *мм* шире, дабы при выходе из шлица паза в процессе укладки обмотки электрокартон предохранял изоляцию проводов от повреждения, а также для того, чтобы края коробочки перекрывали друг друга, образуя

этим между катушкой и деревянным клином двойной слой.

Пазовая коробочка по рис. 50,*а* и *б* применяется при выполнении обмотки проводом марки ПЭЛБО, ПЭЛШО и т. п. Пазовую коробочку по рис. 50,*в* и *г* рекомендуется применять при выполнении обмотки проводом с эмалевой изоляцией, а также в электродвигателях с относительно длинными пакетами стали статора и острыми краями зубцов.

Заготовка верхнего слоя пазовой изоляции берется больше длины сердечника статора на 20—40 *мм*, чтобы по краям коробочки можно было сделать манжеты, которые предохраняли бы выходящие из паза провода

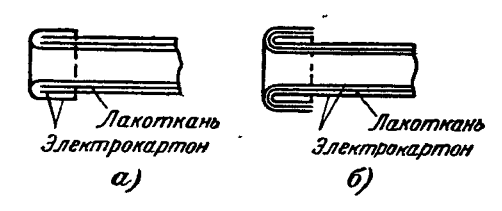


Рис. 51.
а — манжета, образованная верхним слоем пазовой коробочки; *б* — то же, образованная тремя слоями пазовой коробочки.

катушек от механических повреждений, а сама коробочка выступала по обеим сторонам паза на 5—10 *мм*. Длина заготовки среднего и нижнего слоев лакоткани берется на 10—20 *мм* короче длины заготовки верхнего слоя, так как манжета обычно образуется только верхним слоем пазовой изоляции (рис. 51,*а*).

Для увеличения прочности выступающих концов коробочки иногда манжету делают из всех слоев пазовой изоляции (рис. 51,*б*).

Пазовые коробочки с трехслойной манжетой рекомендуется применять в тех статорах, где не предусмотрена установка опорных изоляционных колец из электрокартона на торцах сердечника статора или нельзя применить изолировку нажимных шайб способом, указанным ниже.

Для более быстрого изготовления манжет при изготовлении пазовых коробочек применяют простое приспособление (рис. 52). Раскроенные и вместе сложенные

заготовки пазовой коробочки вкладываются до упора в подвижную пластинку, установленную по длине манжеты, и поворотом заготовок на 180° придают им должную форму.

Дальше заготовки пазовых коробочек обжимаются на оправке и укладываются в пазы статора, расправляя их при этом деревянной оправкой так, чтобы они плотно облегали паз. Форма оправки должна соответствовать форме паза с размерами меньше на толщину пазовой изоляции. Вылеты коробочек с обеих сторон статора должны быть одинаковыми.

Для нижнего слоя пазовой изоляции небольших электродвигателей вместо электрокартона можно применять кабельную бумагу.

Недостатком описанной выше трехслойной пазовой изоляции является большая толщина коробочки, что снижает коэффициент заполнения паза, особенно в малых машинах. В последнее время широкое применение нашли новые виды изоляционных материалов в виде пленкокартона, позволяющего сделать пазовую коробочку более тонкой и эластичной, или склеенные стеклолакоткань и электрокартон, позволяющие повысить теплостойкость изоляции и др.

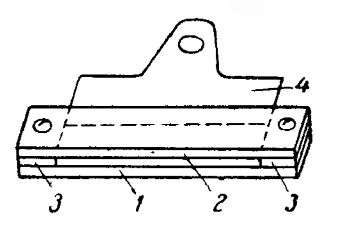


Рис. 52. Приспособление для отбортовки манжеты пазовой коробочки.

Нажимные шайбы сердечника статора изолируются полосками электрокартона, подклеиваемые изоляционным лаком или прикрепляемые окантовочными нитками. Толщину и количество полосок электрокартона следует подбирать так, чтобы они могли служить опорой выходящим из паза концам изоляционных коробочек, одновременно предохраняя их от разрыва при отгибании лобовых частей обмоток.

Кроме пазовой изоляции, должны быть заготовлены: прокладки из электрокартона толщиной 0,3—0,5 *мм* для подклиновой изоляции, которые должны быть шире паза в его верхней части, чем обеспечить ей вид скобочки (рис. 50).

Прокладки из электрокартона толщиной 0,3 или 0,2 *мм* в два слоя применяются в двухслойных обмотках

для укладки между верхней стороной нижней катушки и нижней стороной верхней катушки. Прокладка должна быть шире паза в его средней части, чем обеспечивает надежное разделение слоев обмотки (рис. 50).

Прокладки из электрокартона толщиной от 0,1 до 0,4 *мм* в зависимости от габаритов электродвигателя и прокладки из лакоткани склеиваемые попарно или сложенными вместе кладутся между катушечными группами в качестве междуфазной изоляции в лобовых частях обмотки. В электродвигателях малой мощности междуфазной изоляцией может служить один слой лакоткани. Размеры прокладок для междуфазной изоляции по ширине определяются вылетом лобовой части, а по длине и форме — шагом и видом обмотки. Обычно обмотчик получает заготовки прокладок в процессе укладки обмотки и придает им нужную форму.

21. НАМОТКА КАТУШЕК

Намотку катушек производят на простых или универсальных раздвижных шаблонах с ручным или механическим приводом.

На рис. 59 показан раздвижной шаблон, позволяющий наматывать сразу 12 катушек, что дает возможность выполнять большинство обмоток без пайки схемы. Шаблон состоит из планки с прорезью, двух полукруглых головок с 12 канавками на каждой для размещения катушек в процессе намотки, двух винтов для крепления головок к планке и рукоятки для вращения в случае ручного привода.

Для настройки шаблона необходимо вычислить или практическим путем определить среднюю длину витка. Опытные обмотчики по заданному вылету лобовых частей и шагу обмотки сами могут определить среднюю длину витка, а менее опытным даются готовые размеры витка. Необходимо тщательно определять среднюю длину витка, так как заниженные размеры создадут трудности при укладке катушек в статор, а завышенные повлекут за собой большой вылет, что приведет к перерасходу меди и повреждению обмотки при надевании подшипниковых щитов. Как правило, зазор между лобовыми частями обмотки и подшипниковым щитом должен быть не менее 10 *мм*.

Средняя длина витка мягкой секции (катушки) определяется по формуле

$$l_{м} = 2(l_{л} + L_{п}) \ мм,$$

где $l_{л}$ — длина одной лобовой части мягкой секции (катушки);

$L_{п}$ — полная длина сердечника статора.

Длина одной лобовой части мягкой секции (катушки) вычисляется по формуле

$$l_{л} = A\tau_{у} + Б \ мм.$$

Средняя ширина секции (катушки) $\tau_{у}$ в свою очередь определяется из формулы

$$\tau_{у} = \frac{\pi(D_{в} + h_{z1})\,y}{z_1} \ мм,$$

где $D_{в}$ — внутренний диаметр статора;

h_{z1} — высота зубца сердечника статора;

y — шаг обмотки по пазам.

Значения коэффициентов A и постоянной величины $Б$ выбираются по табл. 9.

Таблица 9

2p	При намотке сердечника вне станины		При намотке сердечника, запрессованного в станину	
	A	Б, мм	A	Б, мм
2	1,25	20	1,30	30
4	1,30	20	1,35	30
6	1,40	20	1,45	30
8	1,50	20	1,55	30

В отдельных случаях при недостаточном опыте в определении средней длины витка рекомендуется изготовить пробную катушку и проверить правильность размеров вкладыванием ее в статор электродвигателя в соответствии с заданным шагом.

При намотке катушек на раздвижном шаблоне, имеющем большой вылет головок, между свободными концами головок следует ставить распорную деревянную планку, чем обеспечить параллельность головок шаблона и одинаковый размер катушек.

Количество наматываемых за одну операцию катушек зависит от принятого метода выполнения обмотки. При выполнении обмотки с пайкой схемы рекомендуется наматывать полностью катушечную группу, а при выполнении обмотки без пайки схемы — всю фазу.

Для подсчета числа витков целесообразно намоточный шаблон оборудовать счетчиком скорости вращения.

Стороны намотанных катушек временно скрепляются лентой и передаются обмотчикам для дальнейших операций.

22. УКЛАДКА КАТУШЕК (СЕКЦИЙ) В СТАТОР

До начала укладки катушек обмотчик должен внимательно изучить обмоточно-расчетные данные данной обмотки, составленные на основании заводских обмоточных таблиц или данных дефектировки и поверочного или полного расчета.

Форма обмоточно-расчетной карточки.

Обмоточно-расчетная карточка

РЕМОНТНЫЙ №________

Тип электродвигателя________

$P =$ ________ *квт*
$U =$ ________ *в*
$I =$ ________ *а*
$n =$ ________ *об/мин*
$z =$ ________

Обмоточный провод: марка________диаметр________
Число параллельных проводов________
Витков в катушке (секции)________
Витков в пазу________
Шаг________
Соединение катушечных групп (число параллельных ветвей)________
Число групп в фазе и катушек в группе________
Вид обмотки________
Соединение фаз________
Вылет обмотки________
Обмотчик________
Дата________

Подпись________

В строке «Соединение катушечных групп» указывается соединение в параллельные ветви или соединение без них. Например: последовательное; 2‖*в*; 3‖*в* и т. д.

В строке «Число групп в фазе и катушек в группе» указывается число катушечных групп или число катушечных полугрупп при выполнении однослойной обмотки «вразвалку» на одну фазу. Например: 6 одинарных, 3 двойных, 2 тройных, 2 одинарных и 2 двойных и т. п.

В строке «Соединение фаз» указывается вид соединения фаз: △/⅄; △; ⅄.

К остальным данным обмоточно-расчетной карточки объяснений не требуется.

При выполнении обмоточных работ обмотчик должен пользоваться обычным монтерским инструментом (плоскогубцы, кусачки, деревянный молоток, нож) и некоторым специальным инструментом.

Для уплотнения проводов в пазу применяется стальная оправка (рис. 53,*а*) при помощи которой обмотчик периодически уплотняет провода.

При обмотке из эмальпровода осаживание и уплотнение производятся только через электрокартонную или фибровую прокладку. Для придания параллельности уложенным проводам применяется фибровая клиновидная пластина (рис. 53,*б*). Для придания соответствующей формы лобовым частям обмотки и правильному их расположению также применяется фибровая клиновидная пластинка (рис. 53,*б*).

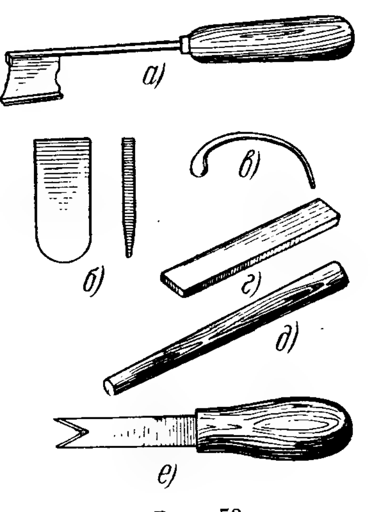


Рис. 53.
а—стальная оправка; *б*—фибровая клиновидная пластина; *в*—проволочный крючок; *г* и *д*—колодочки; *е*—специальный нож.

Для обрезки электрокартона, выступающего из шлица паза (при форме пазовой коробочки по рис. 50,*в* и *г*), применяется специальный нож (рис. 53,*е*).

Кроме приведенных инструментов и приспособлений, обмотчик должен иметь проволочные крючки для протаскивания ленты при бандажировке лобовых частей

обмотки и ножницы для срезывания выступающей междуфазной изоляции.

Наиболее распространенным способом выполнения обмотки при полузакрытых пазах это укладка через шлиц паза по одному проводу (всыпная обмотка), где по мере укладывания витков следует фибровой клиновидной пластиной проводить вдоль паза для устранения перекрещивания проводов и легким нажатием оправкой, вводимой в паз с его торца, периодически уплотнять провода.

После укладки катушек и уплотнения проводов на верхней стороне катушки кладут изоляционную прокладку и деревянный клин, удерживающий обмотку в пазах.

Если верхний слой пазовой коробочки выступает из шлица паза, то после укладки обмотки эту изоляцию срезают специальным ножом и верхний слой коробочки загибают внутрь паза (рис. 50,*г*).

Деревянные клинья предварительно заготавливаются из сухого бука или березы, а их длина должна быть больше длины сердечника статора на 10—20 *мм* и равны или немного меньше длины пазовой коробочки. Толщина клина зависит от формы верхней части паза и его заполнения, но не меньше 2 *мм*. Для придания клиньям влагостойкости рекомендуется проваривать их в олифе при температуре 120—140° С в течение 3 *ч* или до прекращения образования пены и пузырьков на поверхности олифы, а затем в течение 8—10 *ч* просушивать при температуре 110—115° С.

Для малых машин вместо деревянных клиньев можно применять прокладки из электрокартона толщиной 0,5—1 *мм*.

При двухслойных обмотках между верхней и нижней катушками кладут изоляционную прокладку из электрокартона (рис. 50,*б* и *г*).

В лобовых частях между катушечными группами разных фаз ложатся прокладки из электрокартона и лакоткани. После расклинивания обмотки ее лобовые части ударами молотка через деревянную или фибровую прокладку (колодочку) отгибаются в сторону, противоположную ротору.

23. СБОРКА СХЕМЫ, ИЗОЛИРОВКА МЕСТ СОЕДИНЕНИЙ, БАНДАЖИРОВКА ОБМОТКИ

Если фаза обмотки намотана отдельными катушками, сборку схемы начинают с последовательного соединения катушек в катушечные группы. В целях сокращения числа паек катушечные группы наматываются из целого куска провода, что повышает производительность труда и экономит материалы.

За начала фаз принимают выводы катушечных групп, выходящие из пазов, расположенных вблизи выводного щитка, что уменьшает длину выводных проводов, особенно у обмоток, имеющих четыре и больше полюсов. Разумеется, расстояние между началами фаз, равное $2q$, должно быть сохранено. Выводы катушечных групп, принятые за начала фаз, отгибаются к телу статора и соединяются катушечные группы каждой фазы в соответствии со схемой методом скрутки предварительно зачищенных от изоляции концов проводов.

Предварительно соединенная схема обмотки мегомметром проверяется на отсутствие замыканий на корпус и между отдельными фазами. Кроме того, проверяется и правильность соединения схемы при помощи стального шарика, вертушки или компаса. Если обмотка соединена правильно, стрелка компаса, передвигаемого по расточке статора, отметит число пар полюсов электродвигателя, причем на каждую пару полюсов будет приходиться одинаковое число пазов. Вместо компаса можно приспособить стальную пластинку или ученическое перо, которые в магнитном поле статора намагничиваются и некоторое время удерживают на концах постоянную разноименную полярность. Вращение стального шарика по окружности расточки статора и вращение вертушки, помещенной в центре расточки статора, также покажут правильность соединения схемы.

При проверке правильности соединения схемы при помощи компаса к фазам статора поочередно подают постоянный ток от аккумуляторной батареи. При проверке обмотки стальным шариком или вертушкой статор кратковременно подключают к сети при пониженном или номинальном напряжении электродвигателя.

Если имеется аппарат СМ-1 (СМ-2, СМ-4), проверку

предварительно собранной схемы обмотки производят этим аппаратом.

Перед пайкой или сваркой соединений схемы рекомендуется проверить обмотку на витковые замыкания в пазах. После проверки производится сварка или пайка всех соединений обмотки, а к началам и концам фаз присоединяют выводные провода из гибкого провода марки ПРГ, подключаемые к зажимным шпилькам выводного щитка. Сечение выводных проводов выбирают в зависимости от условий охлаждения, величины и вида нагрузки электродвигателя (табл. 10), а сечение шпилек выводного щитка — в зависимости от нагрузки электродвигателя (табл. 11).

Таблица 10

Сечение выводных проводов обмоток электрических двигателей

Сечение медных проводов, *мм*²	Допустимая нагрузка, *а*			
	продолжительная		кратковременная	
	Открытые вентилируемые машины	Закрытые невентилируемые машины	Открытые вентилируемые машины	Закрытые невентилируемые машины
2,5	26	23	39	30
4	40	33	60	46
6	58	47	87	58
10	84	67	140	110
16	120	100	220	170
25	160	140	320	225
35	200	175	430	350
50	255	220	580	470

Таблица 11

Диаметры выводных шпилек электрических двигателей

Диаметр выводной шпильки, *мм*	Наибольший допустимый ток, *а*	Диаметр выводной шпильки, *мм*	Наибольший допустимый ток, *а*
М 4	14	М 10	200
М 5	25	М 12	300
М 6	48	М 14	500
М 8	100	М 16	800

Если конструкцией электродвигателя выводной щиток не предусмотрен, то выводные провода выводятся через окна или отверстия в станине статора и, где это предусмотрено, крепят к зажимным планкам. Кабельные наконечники к концам выводных проводов электродвигателей мощностью 20 *квт* и выше присоединяются пайкой или электросваркой.

Для небольших по мощности электродвигателей в качестве выводов допускается использование концов и начал фаз обмотки, которые должны быть изолированы линоксиновой трубкой, лакотканью, киперной или тафтяной лентой и выведены на клеммовый щиток. При отсутствии клеммового щитка использование обмоточного провода для выводов не допускается, так как в этих условиях может легко произойти обрыв провода.

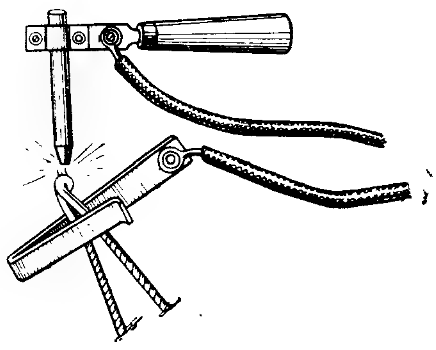


Рис. 54. Соединение проводов электросваркой.

При небольшом сечении проводов соединение схемы обмотки производится электросваркой. К зачищенным и предварительно скрученным проводам касаются медным электродом, имеющим форму стержня или зажима, а к концу скрутки — угольным электродом (рис. 54).

Исходя из безопасных условий работы, напряжение электросварочного трансформатора должно быть от 12 до 36 *в*, а его мощность в зависимости от количества одновременно работающих точек и сечения свариваемых проводов от 0,25 *ква* и выше.

При соединении схемы обмотки пайку проводов производят в большинстве случаев оловянно-свинцовистыми припоями ПОС-50, ПОС-40 (олова 40%, свинца 60%) и ПОС-30, а в качестве флюса — канифоль, облегчающую облуживание и последующую пайку. Провода до пайки должны быть зачищены шкуркой, а длина пайки должна быть не менее 15 *мм*.

Места соединений после пайки или сварки тщательно изолируются полосками лакоткани шириной 15—20 *мм* и тафтяной лентой или предварительно надетыми и сдвинутыми в сторону на время сварки (пайки) изоляционными трубками.

После изолировки соединительные провода укладываются на лобовой части обмотки, бандажируются ки-

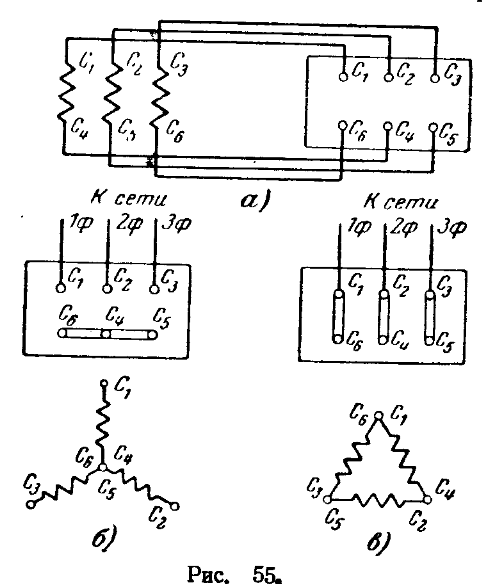


Рис. 55.

а — расположение выводов фаз обмотки на щитке; *б* — соединение фаз в звезду; *в* — соединение фаз в треугольник.

перной или тафтяной лентой «вперекрой» или «вразбежку» и окончательно укладываются по месту.

Начала и концы фаз нумеруются согласно ГОСТ (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6) и выводятся на клеммовый щиток так, чтобы удобно было производить соединение фаз в звезду или треугольник, поэтому их располагают, как показано на рис. 55.

При выполнении обмотки из алюминиевых обмоточных проводов следует учитывать, что болтовые и прижимные контактные соединения алюминий — алюминий и алюминий — медь неустойчивы, так как поверхностный слой алюминия, соединяясь с кислородом воздуха,

образует малоэлектропроводную и тугоплавкую пленку окиси, а алюминий и медь образуют гальванопару, разрушающую контакт этих соединений. Поэтому только сварка дает надежное и устойчивое соединение алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными проводами.

Достаточно надежное и прочное соединение алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными проводами может обеспечить также пайка с применением специальных припоев и флюсов.

В последнее время изысканы способы холодной сварки алюминиевых проводов при помощи специальных клещей. В результате сжатия проводов при высоком давлении образуется прочное, монолитное соединение их.

Способ соединения алюминиевых проводов электросваркой[1]. Сваривание проводов осуществляется за счет тепла, выделяемого в месте их контакта с токоведущими графитовыми губками ручных клещей и графитовым электродом, которые присоединяют к вторичной обмотке трансформатора напряжением 4—8 *в* и мощностью 3—5 *ква*. Сварка производится без применения флюса.

Указанным методом можно сваривать круглые и прямоугольные алюминиевые провода сечением от 0,2 *мм*^{2} и более. Длительность сварки одножильных проводов диаметром 1 *мм* не превышает 2—3 *сек*, при этом длина сварного соединения должна быть не менее 1,5—2 диаметров провода. Перед сваркой концы круглых проводов соединяются скруткой.

Для пайки алюминиевых проводов могут быть применены следующие припои и флюсы.

Припой: олова — 90%, цинка — 10%. Температура плавления выше 200° С. Флюс: фтороборат кадмия 10% ±0,5, фтороборат аммония 8% ±0,5 и триэтаноламин 82% ±1.

Во избежание коррозии металла удаление остатков флюса осуществляется промывкой[2].

---

[1] И. Р. Лехциер, Методы соединения алюминиевых проводов и шин между собой и оконцевание их медью, материалы научно-технического совещания ЦИНТИ 1960 г.

[2] Г. Я. Шкилько, О производстве асинхронных двигателей с алюминиевой обмоткой, Электропромышленность и приборостроение, 1960, № 15.

Припой: олова — 55%, цинка — 25%, кадмия — 20%. Температура плавления 200° С.

Или: олова — 40%, цинка — 25%, алюминия — 15%, кадмия — 20%. Температура плавления 250° С.

Флюс: хлористого бария (безводного) — 48%; хлористого калия — 29%; хлористого натрия — 19%; фтористого кальция — 4%.

Остатки флюса должны тщательно удаляться.

Использование алюминиевых обмоточных проводов в качестве выводов к выводному щитку не рекомендуется из-за их хрупкости. Выводы из многожильного провода марки АПРГ должны иметь медные кабельные наконечники, присоединенные сваркой или пайкой.

24. ИСПЫТАНИЕ ОБМОТКИ

После намотки статора производится испытание электрической прочности изоляции.

Изоляция обмотки относительно корпуса электродвигателя и между фазами должна выдерживать испытательное напряжение в течение 1 *мин.*

Испытательное напряжение по существующим нормам должно быть равно двойному номинальному напряжению электродвигателя плюс 1 000 *в* ($2E+1\,000$).

Перед испытанием проверяется наличие обрыва в фазах обмотки.

Окончательная проверка правильности собранной схемы и витковых замыканий производится на аппарате СМ-1 (СМ-2 и др.) или же другими описанными в технической литературе способами.

25. ПРИМЕРЫ УКЛАДКИ КАТУШЕК В СТАТОР И СБОРКИ СХЕМЫ РАЗНЫХ ВИДОВ ОБМОТОК

Требуется намотать однослойную секционную обмотку по схеме рис. 56 со следующими данными: $z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=6$; $a=1$.

Катушечная группа данной обмотки состоит из двух катушек; фаза состоит из двух катушечных групп.

Берется катушечная группа, где левые стороны катушек, если смотреть со стороны схемы, укладываются в любые два рядом расположенных паза, считая их за 1-й и 2-й порядковый номер. Правые стороны катушек укладываются согласно шагу в 7-й и 8-й пазы.

Для того чтобы наметить начало первой фазы, левый вывод из 1-й катушечной группы загибается к телу статора и, двигаясь по расточке статора против часовой стрелки, пропускается q пазов, т. е.

два паза, и укладывают вторую катушечную группу левой стороной в 5-й и 6-й, а правой стороной — в 11-й и 12-й пазы. Снова пропустив два паза, укладывают третью катушечную группу левой стороной в 9-й и 10-й, а правой стороной — в 15-й и 16-й пазы.

Вложив еще три катушечные группы, приступают к соединению катушечных групп.

Предварительно определяют начало 2-й и 3-й фаз при расстоянии между началом 1-й и началом 2-й, началом 2-й и началом 3-й фаз, равном $2q$.

Началом 2-й фазы будет вывод, выходящий из 5-го паза, а началом 3-й фазы — вывод, выходящий из 9-го паза. Чтобы правильно соединить между собой катушечные группы, следует учитывать, что

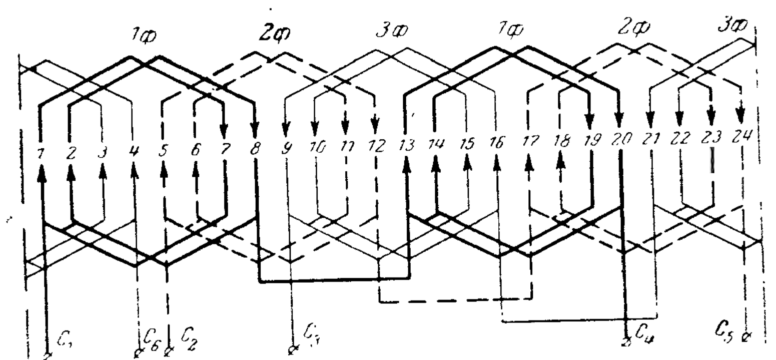


Рис. 56. Схема однослойной секционной обмотки.
$z = 24$; $2p = 4$; $q = 2$; $y = 6$.

в однослойных секционных обмотках катушечные группы соединяются: конец первой катушечной группы — с началом второй, конец второй — с началом третьей катушечной группы и т. д.

Соединяют (в 1-й фазе): конец первой катушечной группы, выходящий из 8-го паза,— с началом четвертой по ходу намотки катушечной группы, начало которой расположено от начала первой катушечной группы на расстоянии двух диаметральных шагов, а конец этой катушечной группы, выходящий из 20-го паза, будет концом 1-й фазы.

Следует различать порядковые номера катушечных групп своей фазы и порядковые номера катушечных групп всей обмотки независимо от принадлежности их к той или иной фазе. Чтобы упростить соединение схемы, обмотчики часто нумеруют катушечные группы подряд слева направо (при укладке обмотки против часовой стрелки), а при определении катушечных групп данной фазы пользуются следующим правилом.

Если первую катушечную группу 1-й фазы считать первой, то следующие катушечные группы этой же фазы будут: 4-я, 7-я, 10-я и т. д., т. е. номер последующей катушечной группы будет равен номеру предыдущей катушечной группы плюс три единицы.

Если первая катушечная группа 2-й фазы будет иметь порядко-

вый номер 2, то следующие катушечные группы этой фазы будут иметь номера: 5-й, 8-й, 11-й и т. д.

Если первая катушечная группа 3-й фазы будет иметь номер 3, то следующие катушечные группы этой фазы будут иметь номера: 6-й, 9-й, 12-й и т. д.

Соединение катушечных групп во 2-й и 3-й фазах производится аналогично соединению катушечных групп в первой фазе (рис. 56).

Выполненная в указанной последовательности обмотка будет иметь некоторую несимметрию лобовых частей, так как, укладывая первую катушечную группу 1-й фазы, здесь пренебрегли тем, что левая ее сторона должна быть вложена в 1-й и 2-й пазы после того, как будет вложена правой стороной последняя (шестая) катушечная группа в 3-й и 4-й пазы.

Чтобы выполнить эту обмотку с симметричным расположением катушек в лобовых частях, следует первую катушечную группу

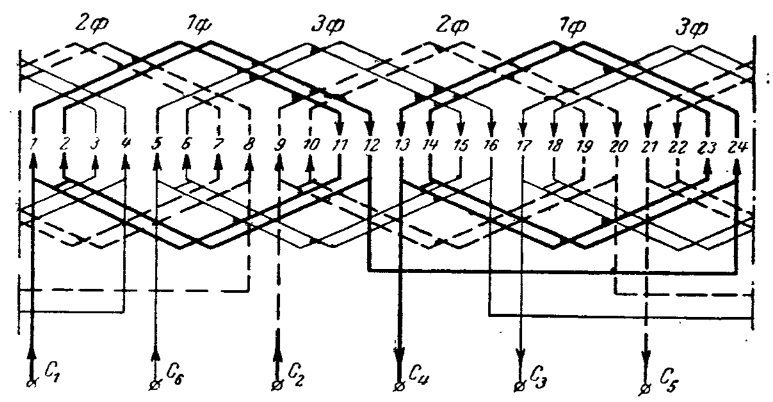


Рис. 57. Схема однослойной секционной обмотки „вразвалку".
$z = 24$; $2p = 2$; $q = 4$; $y = 10$.

укладывать в пазы только правыми сторонами катушек, а левые стороны вложить временно (при открытых пазах) или оставить приподнятыми до тех пор, пока не будут вложены в 3-й и 4-й пазы правые стороны катушек последней катушечной группы.

Однослойные секционные обмотки небольших габаритов в большинстве случаев выполняются с несимметричным расположением катушек в лобовых частях, что допустимо. Обмотки средних и крупных электродвигателей должны быть выполнены с соблюдением симметрии лобовых частей.

Требуется намотать однослойную секционную обмотку «вразвалку» согласно рис. 57.

Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=10$.

Каждая фаза данной обмотки состоит из двух катушечных полугрупп, а каждая полугруппа — из двух катушек.

Укладка катушечных полугрупп производится следующим образом.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы укладывают левой стороной в первый и второй пазы, а правой стороной — в 11-й и 12-й пазы.

Катушечную полугруппу следующей фазы левой стороной укладывают через $q:2$ пазов в 5-й и 6-й пазы, т. е. пропустив два паза по ходу намотки статора, а правой стороны — в 15-й и 16-й пазы.

Катушечную полугруппу последующей фазы укладывают левой стороной в 9-й и 10-й пазы (также пропустив два паза), а правой стороной — в 19-й и 20-й пазы.

В таком же порядке укладывают остальные катушечные полугруппы. Затем размечают начала фаз, расположенные на расстоянии $2q$ друг от друга. В данном случае начало первой фазы расположено в 1-м пазу, начало 2-й — в 9-м, а начало 3-й фазы — в 17-м пазу.

После укладки катушечных полугрупп их попарно соединяют в каждой фазе: конец первой катушечной полугруппы соединяется с концом второй, начало второй — с началом третьей и т. д.

Как и в предыдущем примере, нумерация катушечных полугрупп производится порядковыми номерами, соединив катушечные полугруппы в каждой фазе следующим образом.

Конец первой катушечной полугруппы 1-й фазы соединяем с концом четвертой катушечной полугруппы, начало которой будет концом 1-й фазы.

Конец третьей катушечной полугруппы 2-й фазы соединяем с концом шестой катушечной полугруппы, начало которой будет концом 2-й фазы.

Конец пятой катушечной полугруппы 3-й фазы соединяем с концом второй катушечной полугруппы (вместо восьмой она имеет второй номер, так как в обмотке всего шесть катушечных полугрупп). Начало второй катушечной полугруппы будет концом 3-й фазы.

В данной обмотке (рис. 57) катушечные полугруппы фаз чередуются в такой последовательности: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д.

Выполненная указанным способом обмотка будет иметь допустимую несимметрию лобовых частей, так как первая и вторая катушечные полугруппы вложены в пазы обеими сторонами.

Чтобы выполнить данную обмотку с симметричным расположением катушек в лобовых частях, следует левые стороны первой и второй катушечных полугрупп укладывать в пазы после того, как будут заполнены 3-й, 4-й, 5-й и 6-й пазы правыми сторонами последних по ходу намотки катушечных полугрупп. Обмотки средних и крупных электродвигателей должны быть выполнены с соблюдением симметрии лобовых частей.

Требуется намотать двухслойную обмотку со следующими данными: $z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=5$ (рис. 58).

Каждая фаза обмотки здесь имеет четыре катушечные группы, где каждая состоит из двух катушек.

Выполнение двухслойной обмотки начинается с укладки нижних сторон катушек в пазы по шагу обмотки.

Первую катушечную группу 1-й фазы (любую берем) правой стороной укладывают (если смотреть со стороны схемы) в 6-й и 7-й пазы, а левые стороны, которые должны заполнить верхнюю часть 1-го и 2-го пазов, оставляют неуложенными.

Следующую катушечную группу (по схеме обмотки она принадлежит к 3-й фазе) правой стороной укладывают в 8-й и 9-й пазы, а их левые стороны, которые должны быть уложены в верхнюю часть 3-го и 4-го пазов, оставляют неуложенными.

Аналогично укладываются и последующие катушечные группы всех фаз.

При выполнении как однослойных, так и двухслойных обмоток катушечные группы не нумеруются, а их укладка производится подряд и только после укладки всех катушечных групп производится распределение их по фазам.

Примечание. По мере укладывания катушек в пазы между нижними и верхними сторонами катушек, а также между клиньями и проводом верхней катушки ложатся изоляционные прокладки.

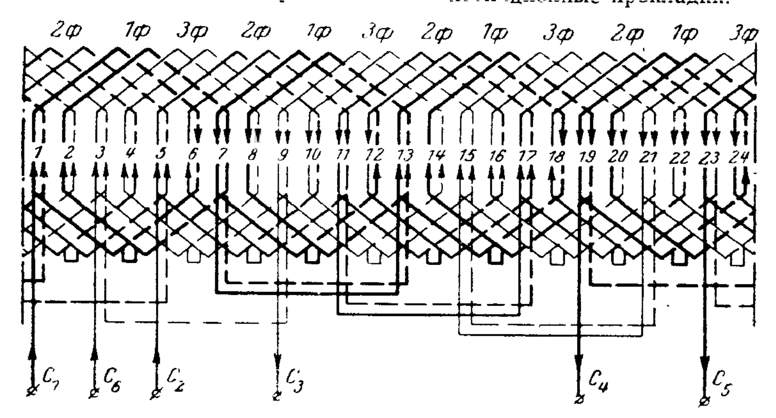


Рис. 58. Схема двухслойной обмотки.
$z = 24$; $2p = 4$; $q = 2$; $y = 5$.

Соединение катушечных групп в фазе производится следующим образом: конец 1-й катушечной группы соединяется с концом 2-й, начало 2-й — с началом 3-й и т. д. Перед соединением следует определить расположение начал фаз, которые, кроме обмоток с дробным q, располагаются через число пазов, равное $2q$. В данном случае $2q = 2 \cdot 2 = 4$, откуда началами фаз будут выводы катушечных групп из 1-го, 5-го и 9-го пазов. Во всех обмотках каждая четвертая по ходу намотки статора катушечная группа относится к одной определенной фазе, поэтому достаточно знать, к какой фазе относится одна катушечная группа, чтобы найти остальные катушечные группы этой фазы и, определяя начала фаз, тем самым устанавливать и место 1-й катушечной группы каждой фазы.

Такое распределение катушечных групп в фазе действительно и для однослойных обмоток «вразвалку», с той лишь разницей, что вместо катушечных групп по окружности статора будут размещены в такой же последовательности катушечные полугруппы.

Соединив катушечные группы каждой фазы, получится, что выводы, выходящие из 19-го, 23-го и 3-го пазов, будут концами 1-й, 2-й и 3-й фаз, которые размещены в обмотке через $2q$ пазов.

Выполненная таким способом двухслойная обмотка является симметричной не только по конструкции, но и по размещению лобовых частей. Определение шага по лобовой части таких обмоток представляет некоторую трудность, поэтому они часто называются обмотками с «закрытым шагом».

Выполнение обмоток статоров небольших по габаритам электродвигателей с «закрытым шагом» является затруднительным, так как находящиеся в расточке статора неуложенные верхние стороны первых катушечных групп мешают укладывать последующие катушечные группы. Поэтому для облегчения выполнения обмотки и повышения производительности труда двухслойные обмотки небольших электродвигателей могут быть выполнены следующим способом.

Первые катушечные группы сначала укладывают обеими сторонами в нижние части пазов. Число катушек, верхние и нижние стороны которых будут уложены, зависит от шага обмотки. Затем укладываются катушки, которые своей правой стороной должны занимать нижние части, а левой — верхние части.

Последние катушки также укладываются обеими сторонами, только в верхние части пазов.

В результате такого размещения катушек обмотка будет иметь некоторую несимметрию, допустимую для малых электродвигателей.

Первые пять катушек (рис. 58) расположены обеими сторонами в нижнем слое обмотки, а последние пять катушек (начиная с 20-го паза) обеими сторонами расположены в верхнем слое обмотки.

Так как при таком способе укладки катушек легко подсчитать шаг обмотки, такие обмотки часто называются обмотками с «открытым шагом».

Порядок укладки катушечных групп при однослойной секционной обмотке «вразвалку» с нечетным q и при одинаковом шаге (рис. 30).

Данные обмотки: $z=18$; $2p=2$; $q=3$; $y=7$.

Фаза состоит из двух катушечных полугрупп, из которых у одной две катушки в полугруппе, а у другой — одна катушка.

Характерная особенность этой обмотки заключается в том, что катушки катушечной полугруппы, состоящей из двух катушек, размещаются не в рядом лежащих пазах, а через паз.

Обмотку выполняют следующим образом.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы с двумя катушками левой стороной укладывают в 1-й и 3-й пазы, а правой по шагу — в 8-й и 10-й пазы, где вывод из 1-го паза будет началом 1-й фазы.

Пропуская по ходу намотки статора один паз (против часовой стрелки), укладывают катушечную полугруппу с одной катушкой 3-й фазы левой стороной в 5-й паз, а правой — в 12-й паз.

Снова пропуская один паз, укладывают катушечную полугруппу с двуми катушками 2-й фазы левой стороны в 7-й и 9-й пазы, а правой по шагу — в 14-й и 16-й пазы.

Пропуская один занятый уже правой стороной первой катушечной полугруппы 1-й фазы паз, укладывают полугруппу с одной катушкой 1-й фазы в 11-й и 18-й пазы.

Снова пропуская один занятый уже правой стороной одной катушки 3-й фазы паз, укладывают две катушки 3-й фазы левой стороной в 13-й и 15-й пазы, а правой — во 2-й и 4-й пазы.

Катушку следующей полугруппы 2-й фазы укладывают по тому же правилу в 17-й и 6-й пазы.

Началами фаз будут выводы, выходящие из 1-го, 7-го и 13-го пазов, т. е. из пазов, расположенных через $2q$.

Выполнив соединение катушечных полугрупп по правилу «конец с концом, начало с началом», свободные выводы из 11-го, 17-го и 5-го пазов, расположенные через $2q$, будут концами 1-й, 2-й и 3-й фаз.

Порядок укладки катушечных групп в статор электродвигателя при выполнении однослойной секционной обмотки «вразвалку» при нечетном q и разном шаге (рис. 38).

Данные обмотки: $z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_1=7$; $y_2=8$.

Фаза состоит из четырех катушечных полугрупп — двух с двумя и двух с одной катушкой в полугруппе.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы левой стороны укладывают в 1-й и 2-й пазы, а правой — в 9-й и 10-й пазы по шагу равном $y_2=8$.

Пропуская два паза по ходу намотки статора против часовой стрелки, укладывают катушечную полугруппу: катушку 3-й фазы левой стороной в 5-й, а правой — в 12-й пазы по шагу равном $y_1=7$. Далее, пропуская один паз и укладывая катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек, 2-й фазы левой стороной в 7-й и 8-й, а правой — в 15-й и 16-й пазы по шагу равном $y_2=8$, снова пропускают два занятых правой стороной первой катушечной полугруппы 1-й фазы паза и укладывают катушечную полугруппу: катушку 1-й фазы — в 11-й и 18-й пазы по шагу, равном $y_1=7$. Пропуская еще один паз, занятый уже катушечной полугруппой — катушкой 3-й фазы, укладывают катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек, 3-й фазы, левой стороной в 13-й и 14-й, а правой в 21-й и 22-й пазы.

Укладку остальных катушечных полугрупп производят в таком же порядке.

Началами фаз будут выводы, выходящие из 1-го, 7-го и 13-го пазов, расположенные через $2q$.

Соединив катушечные полугруппы в фазах по правилу «конец с концом, начало с началом», свободные выводы 29-го, 35-го и 5-го пазов, расположенные через $2q$, и будут концами 1-й, 2-й и 3-й фаз.

Рассматривая ряд схем обмоток, можно заметить, что при намотке статора против часовой стрелки катушечные группы разных фаз чередуются в такой последовательности:

В двухслойных обмотках

1ф—3ф—2ф — 1ф—3ф—2ф — 1ф—3ф—2ф и т. д.;

В однослойных секционных обмотках «вразвалку» (катушечные полугруппы)

1ф—3ф—2ф — 1ф—3ф—2ф — 1ф—3ф—2ф и т. д.;

В однослойных секционных обмотках

1ф—2ф—3ф—1ф—2ф—3ф—1ф—2ф—3ф и т. д.

Зная все эти правила, каждый обмотчик может собрать схему обмотки, не имея перед собой подробно вычерченной на бумаге схемы обмотки.

26. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА БЕЗ ПАЕК СХЕМЫ

При намотке статора электродвигателя самой сложной и квалифицированной операцией является сборка схемы, особенно при наличии большого количества катушечных групп в фазах. После укладки катушечных групп в лобовой части обмотки со стороны схемы получается много начал и концов катушечных групп разных фаз, что усложняет соединение схемы, особенно для начинающих обмотчиков. Кроме того, после соединения схемы наступает кропотливая работа по сварке мест соединений и их изолировка.

При выполнении обмоток алюминиевым проводом процесс пайки (или сварки) схемы особенно трудоемок и для этой работы требуются обмотчики высокой квалификации.

Для уменьшения трудоемкости по соединению схемы, экономии материалов и электроэнергии на Винницком электротехническом заводе внедрен и на протяжении многих лет применяется способ выполнения обмотки статора без паек схемы. Применяя этот способ, все обмотчики, включая и молодых, легко и быстро выполняют намотку статора без пайки схемы.

Для работы этим методом следует на всю фазу готовить катушки комплектно, без разрыва провода на раздвижном шаблоне, головки которого имеют 12—18 канавок для размещения в них катушек в процессе намотки фазы. Для малых электродвигателей головки раздвижного шаблона имеют 12 канавок, а для средних и крупных — 18 канавок.

На рис. 59 показан шаблон с ручным приводом. Головки шаблона имеют 12 канавок, позволяющих одновременно изготовлять 12 катушек. На шаблоне намотано только шесть катушек, которые разделены кусочками линоксиновой трубки на три катушечные группы, каждая из которых состоит из двух катушек. Намотчица катушек, начиная намотку фазы обмотки, заранее готовит столько кусочков линоксиновой трубки на фазу, сколько имеется в ней катушечных групп минус единица. Длина заготовок линоксиновой трубки зависит от диаметра статора, шага и вида обмотки. По мере намотки катушечной группы намотчица пропускает на свое место изоля-

ционную трубку, а остальные придерживает надетыми на провод до перехода на следующую катушечную группу. На рис. 59 линоксиновые трубки находятся на переходах между второй и третьей катушками и между четвертой и пятой катушками.

На рис. 60,*б* показана фаза, подготовленная для выполнения обмотки без паек схемы, которая состоит из трех катушечных групп (в каждой группе две катушки), между которыми в процессе намотки катушек помещаются линоксиновые трубки.

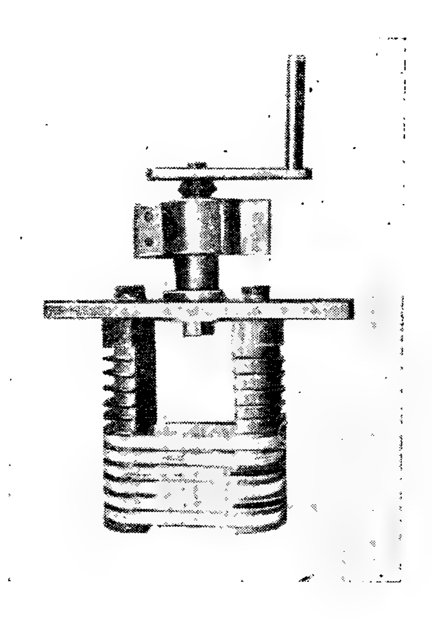


Рис. 59. Шаблон для намотки катушек (секций).

На рис. 60,*а* показана фаза для такой же обмотки, но с пайкой схемы. Каждая из трех катушечных групп имеет два вывода, а всего на фазу — шесть выводов.

Выполнение обмоток без пайки схемы не усложняет процессов укладки катушечных групп в статор, так как порядок намотки остается тем же, что и при выполнении обмотки с пайкой схемы.

На рис. 61 показан статор электродвигателя типа АО-51-6 мощностью 2,8 *квт*, 1 000 *об/мин* в процессе выполнения обмотки без пайки схемы. Данные обмотки следующие: $z=36$; $2p=6$; $q=2$; $y=1—7$.

В статор вложено по две катушечные группы каждой фазы; остальные расположены в определенном порядке на рабочем месте обмотчика. Вывод 1-й фазы находится первым слева, следующим расположен вывод 3-й фазы, за ним — вывод 2-й фазы.

Укладка катушечных групп данного электродвигателя производится следующим образом.

Первую катушку 1-й фазы левой стороной укладывают в любой паз, приняв его за 1-й, вторую катушку

первой катушечной группы 1-й фазы укладываем во 2-й по часовой стрелке. Порядок намотки по или против часовой стрелки зависит от привычки обмотчика. Правые стороны катушек первой катушечной группы 1-й фазы укладывают в пазы по шагу обмотки.

Пропуская два паза (т. е. q пазов), укладывают первую катушку 3-й фазы левой стороной (с выводом) в 5-й паз, вторую катушку этой катушечной группы — левой стороной в 6-й паз, а правые стороны — в пазы по шагу обмотки. Так как $2q=2\cdot2=4$, вывод из 5-го паза будет началом 3-й фазы.

Пропуская снова два паза, укладывают первую катушку 2-й фазы левой стороной (с выводом) в 9-й паз, вторую этой катушечной группы — левой стороны в 10-й паз, а правые стороны—в пазы по шагу обмотки. Вывод из 9-го паза будет началом 2-й фазы $[5+2q=5+2\cdot2=9]$.

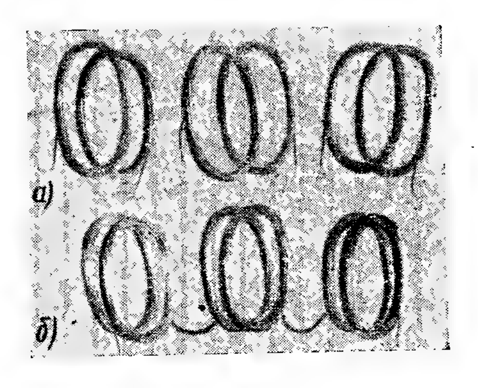


Рис. 60.

а — катушечные группы фазы однослойной секционной обмотки, выполняемой с пайкой схемы; *б* — фаза однослойной секционной обмотки, выполняемой без паек схемы.

Пропуская еще два паза, укладывают левые стороны второй катушечной группы 1-й фазы, а правые стороны укладывают по шагу обмотки.

Необходимо заметить, что здесь незанятыми оказались только два паза при укладке первой катушечной группы 3-й фазы, а в дальнейшем те пазы, которые следовало пропускать, уже были заняты правыми сторонами соответствующих катушечных групп. Поэтому, начиная с первой катушечной группы 2-й фазы, укладывались левые стороны катушечных групп в свободные два паза по ходу расточки статора (по часовой стрелке), что значительно облегчает выполнение обмотки.

Далее укладывают в такой же последовательности вторую катушечную группу 3-й фазы, вторую 2-й фазы,

третью 1-й фазы, третью 3-й фазы и третью катушечную группу 2-й фазы. Выводы последних катушек будут концами фаз.

Выполнение остальных технологических операций производится в такой же последовательности, как и при выполнении обмотки с пайкой схемы.

Порядок выполнения обмоток без пайки схемы показан на рис. 62, где приведена схема однослойной сек-

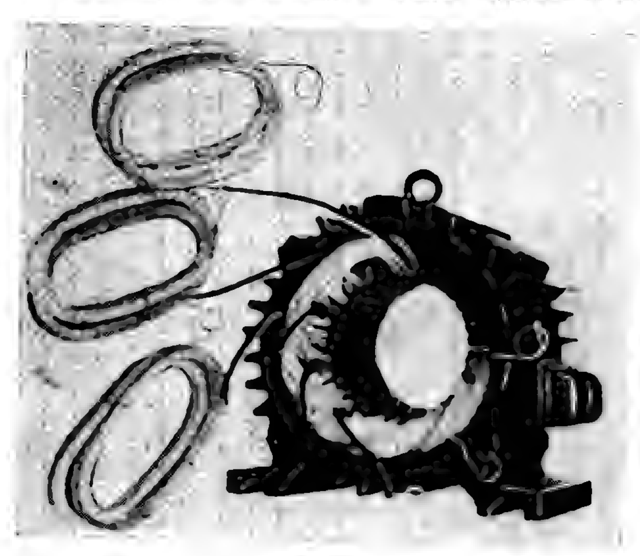


Рис. 61. Статор электродвигателя типа А051-6 мощностью 2,8 *квт* в процессе выполнения обмотки без паек схемы.

ционной обмотки электродвигателя со следующими данными: $z=18$; $2p=6$; $q=1$; $y=3$.

Фаза состоит из трех катушечных групп с одной катушкой в катушечной группе.

Укладку катушек этой и последующих обмоток производят, двигаясь по расточке статора против часовой стрелки.

Первую катушечную группу (катушку) 1-й фазы левой стороной укладывают в 1-й паз, а правой—согласно шагу, т. е. в 4-й паз.

Пропуская один паз ($q=1$), укладывают первую ка-

тушку 2-й фазы левой стороной в 3-й паз, а правой — по шагу.

Первую катушку 3-й фазы левой стороной укладывают в 5-й паз, а правой — по шагу обмотки.

Дальше катушки укладываются, чередуя фазы: вторая катушка 1-й фазы, вторая катушка 2-й фазы, вторая катушка 3-й фазы, третья катушка 1-й фазы, третья катушка 2-й фазы, третья катушка 3-й фазы.

Выводы с первых катушек будут началами фаз, выводы с последних катушек будут их концами.

Однослойная секционная обмотка «вразвалку» (рис. 57). Данные обмотки: $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=10$.

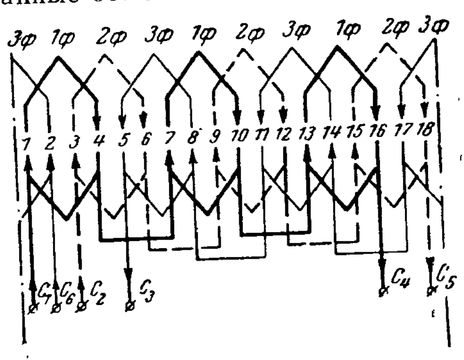


Рис. 62. Схема однослойной секционной обмотки.

$z=18$; $2p=6$; $q=1$; $y=3$.

При выполнении однослойных секционных обмоток «вразвалку» следует учитывать, что катушечные полугруппы в обмотке чередуются в последовательности: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза, 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д.

Катушечные полугруппы в фазе соединяются «конец с концом, начало с началом».

Намотку данного электродвигателя производят в таком порядке.

Первую катушечную полугруппу 1-й фазы левой стороной укладывают в 1-й и 2-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод первой катушки будет началом 1-й фазы.

Пропуская $q/2$ пазов, т. е. два паза, левой стороной

укладывают первую катушечную полугруппу 3-й фазы в 5-й и 6-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод первой катушки будет концом 3-й фазы.

Пропуская еще два паза, укладывают левой стороной первую катушечную полугруппу 2-й фазы в 9-й и 10-й пазы, а правой — по шагу обмотки.

Следующие два паза, которые следовало пропустить, оказались занятыми правой стороной первой ка-

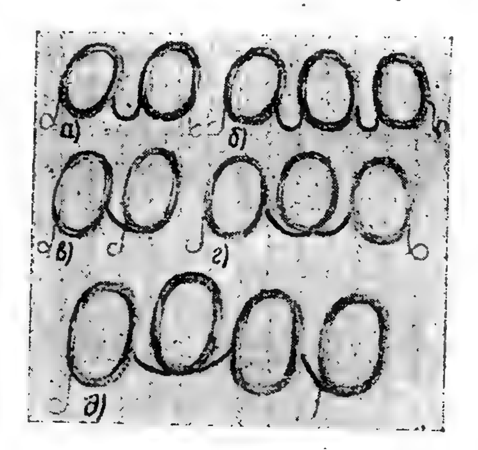


Рис. 63. Расположение катушечных групп (полугрупп) при укладке фазы обмотки (без пайки схемы) в статор.

тушечной полугруппы 1-й фазы, поэтому вторая катушечная полугруппа 1-й фазы расположится рядом с первой катушечной полугруппой этой же фазы.

Но укладывать вторую катушечную полугруппу 1-й фазы так, как укладывали вторую катушечную полугруппу 1-й или любой фазы в однослойных секционных обмотках (рис. 63,*а* и *б*), нельзя, поэтому для получения соединения «конец с концом», «начало с началом» следует вторую катушечную полугруппу перед укладыванием повернуть на 180° так, чтобы правая сторона ее (с выводом) стала левой стороной, а левая сторона — правой стороной (рис. 63,*в*). Вывод из второй катушечной полугруппы будет концом 1-й фазы.

Аналогично укладывают вторую катушечную полугруппу 3-й фазы, вывод из которой будет началом 3-й

фазы, и укладывают вторую катушечную полугруппу 2-й фазы, развернув ее также на 180°, вывод из которой будет концом 2-й фазы.

Двухслойная обмотка (рис. 64).

Данные обмотки $z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=8$.

Фаза состоит из двух катушечных групп, а катушечная группа состоит из четырех катушек.

В двухслойных обмотках катушечные группы чередуются (при укладке их против часовой стрелки) в такой последовательности: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза, 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д., а их соединение в фазе по правилу «конец с концом, начало с началом».

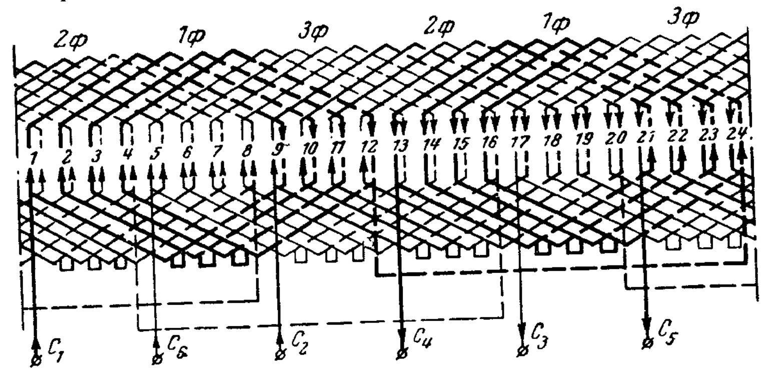


Рис. 64. Схема двухслойиой обмотки.
$z=24$; $2p=2$; $q=4$; $y=8$.

Намотку данного электродвигателя производят следующим образом.

Первую катушечную группу 1-й фазы укладывают левой стороной в 1-й, 2-й, 3-й и 4-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод первой катушки будет началом 1-й фазы.

Первую катушечную группу 3-й фазы левой стороной укладывают в 5-й, 6-й, 7-й и 8-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод из первой катушки будет концом 3-й фазы.

Первую катушечную группу 2-й фазы левой стороной укладывают в 9-й, 10-й, 11-й и 12-й пазы, а правой — по шагу обмотки. Вывод из первой катушки будет началом 2-й фазы.

Вторую катушечную группу 1-й фазы разворачивают на 180° так, чтобы ее правая сторона стала левой, а левая — правой, и укладывают (левую сторону) в 13-й, 14-й, 15-й и 16-й пазы, а правую — по шагу обмотки (в 21-й, 22-й, 23-й и 24-й пазы). Вывод из 13-го паза будет концом 1-й фазы.

Вторую катушечную группу 3-й фазы разворачивают на 180° и укладывают (левую сторону) в 17-й, 18-й, 19-й и 20-й пазы, а правую — по шагу обмотки (в 1-й, 2-й,

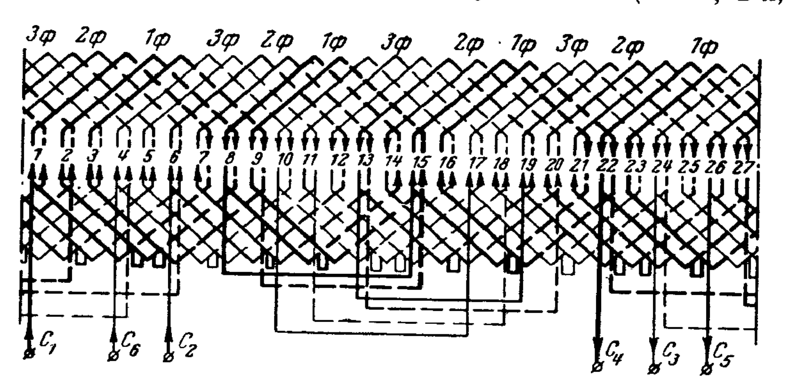


Рис. 65. Схема двухслойной обмотки (2-й вариант — без паек соедннений катушечных групп).

$$z = 27;\ 2p = 4;\ q = 2\frac{1}{4};\ y = 6.$$

3-й и 4-й пазы). Вывод из 17-го паза будет началом 3-й фазы.

Вторую катушечную группу 2-й фазы разворачивают на 180° и укладывают (левую сторону) в 21-й, 22-й, 23-й и 24-й пазы, а правую — по шагу обмотки (в 5-й, 6-й, 7-й и 8-й пазы). Вывод из 21-го паза будет концом 2-й фазы.

После укладки начала фаз должны выходить из 1-го, 9-го и 17-го пазов, а концы — из 13-го, 21-го и 5-го пазов с расстоянием между ними, равным $2q$.

Необходимо заметить, что обмотки без пайки схемы могут выполняться с «закрытым» и «открытым шагом», с симметричным и несимметричным размещением лобовых частей.

Рассмотрим теперь некоторые обмотки, выполненные без пайки схемы. На рис. 65 приведена схема двухслойной обмотки четырехполюсного электродвигателя со следующими данными: $z=27$; $2p=4$; $q=2^1/_4$; $y=6$.

На фазу приходится одна катушечная группа с тремя катушками и три с двумя в группе.

Укладка катушечных групп произведена в следующем порядке: три катушки первой катушечной группы 1-й фазы левой стороной заняли верхнюю часть 1-го, 2-го и 3-го пазов, а правой — нижнюю часть 7-го, 8-го и 9-го пазов; две катушки первой катушечной группы 3-й фазы левой стороной заняли верхнюю часть 4-го и 5-го пазов, а правой — нижнюю часть 10-го и 11-го пазов, две катушки первой катушечной группы 2-й фазы левой стороной заняли верхнюю часть 6-го и 7-го пазов, а правой — нижнюю часть 12-го и 13-го пазов. Далее следуют: две катушки 1-й фазы, три катушки 3-й фазы, две катушки 2-й фазы, две катушки 1-й фазы, две катушки 3-й фазы, три катушки 2-й фазы, две катушки 1-й фазы, две катушки 3-й фазы, две катушки 2-й фазы.

Во всех фазах каждая 2-я и 4-я катушечные группы развернуты на 180° для получения соединения «конец с концом, начало с началом».

Начала фаз выходят из 1-го, 6-го и 24-го пазов, а концы — из 22-го, 26-го и 4-го пазов. Между началами 1-й и 2-й фаз — 5 пазов ($2q=4^1/_2$), а между началами 2-й и 3-й фаз — 18 пазов. Это соответствует $\frac{360p}{z}\cdot 18 = \frac{360\cdot 2}{27}\cdot 18 = 480$ *эл. град.* Если от 480 вычтем 360 *эл. град.*, получится 120 *эл. град*, следовательно электрическая симметрия при построении обмотки выдержана, что видно по размещению полюсов на схеме. Концом 3-й фазы будет выводной конец, выходящий из 6-го паза, откуда начата была укладка 3-й фазы. Для сравнения на рис. 66 приведена обмотка такого же электродвигателя, но с пайкой схемы, которая в электрическом отношении ничем, кроме расположения начала 3-й фазы (паз 10), не отличается от обмотки, выполненной без пайки схемы.

На рис. 67 приведена двухслойная обмотка статора, выполненная без пайки схемы, у которой: $z=27$; $2p=6$; $q=1^1/_2$; $y=4$.

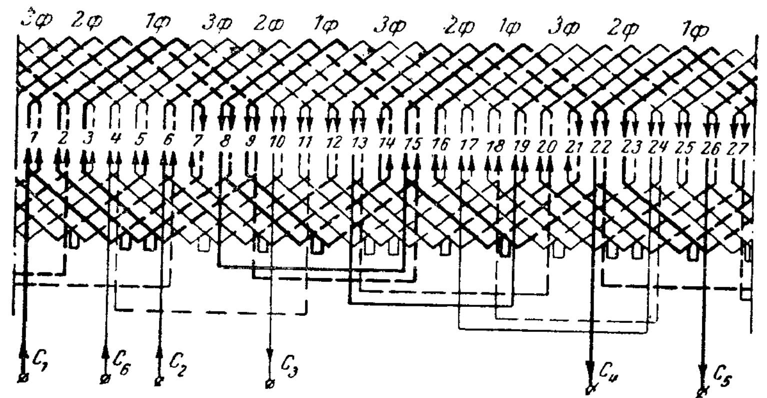


Рис. 66. Схема двухслойной обмотки (1-й вариант — с пайками соединений катушечных групп).

$z = 27$; $2p = 4$; $q = 2\frac{1}{4}$; $y = 6$.

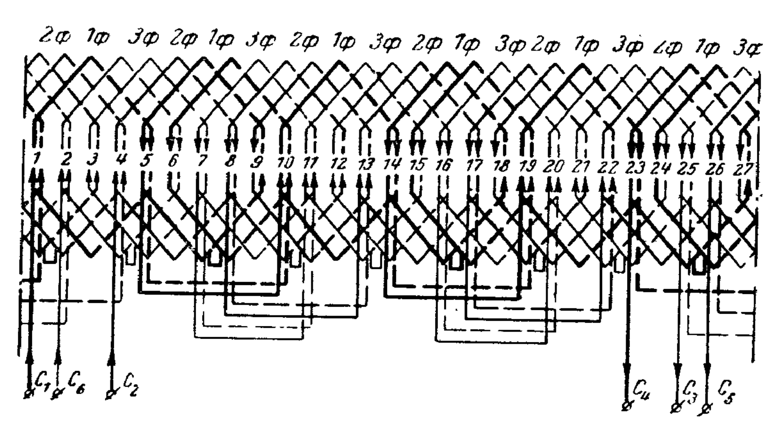


Рис. 67. Схема двухслойной обмотки.

$z = 27$; $2p = 6$; $q = 1\frac{1}{2}$; $y = 4$.

В данной схеме каждая фаза состоит из шести катушечных групп: трех односекционных и трех двухсекционных. Укладка катушечных групп каждой фазы производится по ранее указанной последовательности. Начало 3-й фазы выходит из 25-го паза, удаленного от начала 2-й фазы на расстояние 840 *эл. град*. Если от 840 отнять

2·360, то получим 120 *эл. град.* Таким образом, от перемещения начала 3-й фазы в обмотках без пайки схемы электрическая симметрия не нарушена.

На рис. 68 приведена схема двухслойной обмотки с такими же данными, как и обмотка на рис. 67, но с тремя параллельными ветвями. В каждую параллельную ветвь вошли одна группа из одной секции и одна группа из двух секций. При намотке таких катушек на каждую фазу готовят 3 компл., где в один комплект вхо-

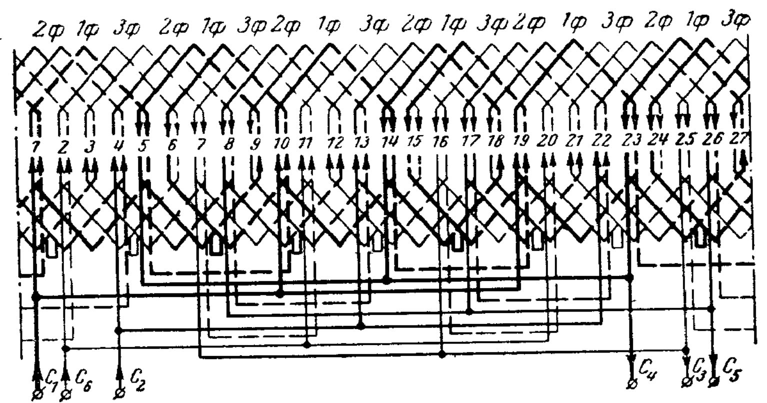


Рис. 68. Схема двухслойной обмотки.

$z = 27;\ 2p = 6;\ q = 1\frac{1}{2};\ y = 4;\ a = 3.$

дят одна группа с одной секцией и одна из двух секций.

Таким образом, для выполнения обмоток без пайки схемы следует учитывать следующее.

В однослойных секционных обмотках катушечные группы независимо от количества их в фазе укладываются в статор в такой же последовательности, в какой производилась намотка катушек, в результате чего соединение катушечных групп получается «конец с началом» (рис. 63,*а* и *б*).

В однослойных секционных обмотках «вразвалку» каждые четные полугруппы в каждой фазе перед укладкой в статор разворачиваются на 180°; в результате соединение катушечных полугрупп получается «конец с концом, начало с началом» (рис. 63,*в* и *д*).

В двухслойных обмотках каждые вторые, четвертые

и т. д., т. е. четные, группы разворачиваются перед укладкой в статор на 180°, в результате чего получается соединение «конец с концом, начало с началом» (рис. 63,*в*, *г* и *д*).

При выполнении обмоток с дробным q и величине дроби, равной $^1/_2$, намотка двух фаз должна быть начата с катушечных групп, имеющих n катушек, и одной фазы с катушечными группами, имеющими $n+1$ катушек или наоборот.

Во всех обмотках независимо от способа выполнения их (с пайкой или без пайки схемы) при изменении направления укладки катушечных групп чередование групп или полугрупп разных фаз в обмотке изменится на обратное. Например, если в двухслойной обмотке чередование катушечных групп разных фаз против часовой стрелки было: 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза, 1-я фаза, 3-я фаза, 2-я фаза и т. д., то при изменении направления укладки катушечных групп на обратное, т. е. по часовой стрелке, чередование катушечных групп разных фаз будет: 1-я фаза, 2-я фаза, 3-я фаза, 1-я фаза, 2-я фаза, 3-я фаза.

Для того чтобы в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу, дробь которого не равна $^1/_2$, симметрично чередовались катушечные группы с разным числом катушек, необходимо при намотке фаз для выполнения обмотки без пайки схемы руководствоваться схемой обмотки и катушечные группы размещать в фазах с разным числом катушек так, чтобы при выполнении обмотки обеспечить указанную выше симметрию. Например, при выполнении однослойной секционной обмотки статора электродвигателя на 600 *об/мин* при $z=36$ на фазу приходятся четыре односекционные и одна двухсекционная группы (см. приложение 9).

В обмотке группы из одной секции и двух секций должны быть расположены в определенной последовательности: 1—1—1—1—2—1—1—1—1—2—1—1—1—1—2. Для получения размещения катушечных групп в обмотке, намотанной против часовой стрелки, катушечные группы из одной и двух секций следует расположить в такой последовательности:

1-я фаза: 1—1—1—2—1;
2-я фаза: 1—2—1—1—1;
3-я фаза: 1—1—1—1—2.

Порядок намотки катушечных групп в фазах можно определить, и не имея схемы обмотки, следующим образом.

Определяют величину q. В приведенном примере

$$q=\frac{z}{m\cdot 2p}=\frac{36}{3\cdot 10}=1\frac{1}{5}.$$

Для данного q определяют порядок чередования катушечных групп в обмотке (см. приложение 9), где чередование будет: 1—1—1—1—2, 1—1—1—1—2 и т. д.

При $z=36$ всех катушек будет 18, а на фазу — 6. Следовательно, на всю обмотку будет 15 катушечных групп.

Составляется таблица, где в верхней строке приводится чередование фаз, а в нижней — чередование катушечных групп в обмотке.

Чередование фаз при укладке обмотки против часовой стрелки	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Чередование катушечных групп в обмотке	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2

По верхней и нижней строкам выбирают порядок чередования групп с одной и двух секций отдельно для каждой фазы:

1-я фаза: 1—1—1—2—1;

2-я фаза: 1—2—1—1—1;

3-я фаза: 1—1—1—1—2.

При таком выполнении получится обмотка фаз с симметричным расположением катушечных групп с разным числом катушек.

27. ВЫПОЛНЕНИЕ ОБМОТКИ РОТОРА

До размотки ротора со стержневой волновой обмоткой необходимо подсчитать количество пазов в сердечнике ротора, а по шагу обмотки определить число полюсов электродвигателя. Кроме того, определяют: количе-

ство витков и замков в бандаже, расположение и количество бандажей, диаметр бандажной проволоки и т. п.

В процессе размотки ротора помечают паз, из которого выходит любой из выводов, идущий к контактным кольцам; считая этот паз первым, фиксируют, в какую сторону произведен выгиб лобовых частей (в правую или левую) стержня, принятого за первый, нумеруют пазы, а также отмечают пазы, из которых выходят стержни, идущие к контактным кольцам, стержни, соединяемые перемычками и соединяемые в звезду. При необходимости снимают схему обмотки.

В процессе размотки уточняются и марка материалов, способ изоляции пазов между катушечными группами, между нижним и верхним слоями обмотки и т. п. Кроме того, изготовляется шаблон по форме стержней нижнего и верхнего слоев.

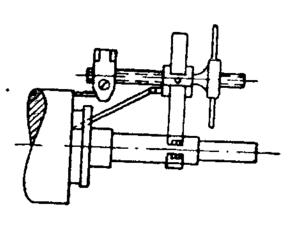


Рис. 69. Приспособление для вытаскивания стержней обмотки ротора.

После снятия проволочных бандажей, распайки соединительных хомутиков верхние стержни в лобовой части выравниваются с одной стороны и вынимаются из пазов, нумеруя их по порядку, считая за первый стержень тот, который вынут из первого паза. Таким же путем выравниваются и вынимаются нижние стержни, где за первый стержень принимается тот, который вынут из 1-го паза.

Необходимо иметь в виду, что верхние стержни немного длиннее нижних, поэтому их следует складывать отдельно.

Для облегчения вытаскивания стержней применяется специальное приспособление.

Приспособление (рис. 69) состоит из стойки, которая закрепляется на валу ротора при помощи хомута и болтов, ползуна с маточной гайкой, который может перемещаться по стойке вверх и вниз, винта с захватом, в котором зажимают конец стержня, и стальной подпорки, которая упирается в ротор. Гайка соединена с воротом. При вращении ворота по часовой стрелке винт вместе с зацепом перемещается в сторону стойки, в результате чего стержень постепенно выходит из паза ротора.

Стержни после выемки очищаются от старой изоляции, выравниваются и рихтуются. Подгорелые стержни с частичным подгаром заменяются новыми. Концы стержней зачищаются стальной щеткой или на наждачном станке и лудятся. В некоторых случаях стержни для удаления старой изоляции обжигаются.

Изолировка стержней и перемычек при изоляции класса А производится хлопчатобумажной лентой (тафтяной) в два слоя, а концы ленты приклеиваются бакелитовым лаком.

После изолировки стержни с одной стороны загибают, придавая им форму полукатушек соответственно шаблону.

Одновременно с подготовкой стержней производится и очистка ротора от старой изоляции, удаляются заусенцы, рихтуются пазы и после продуваются сжатым воздухом. Изолировка пазов выполняется следующим образом.

Изготовляется деревянная оправка по форме паза, наматывают на нее электрокартон толщиной 0,2 *мм*, а между слоями электрокартона наматывается лакоткань, в результате чего получается гильза из трех слоев: два слоя электрокартона, а между ними один слой лакоткани.

Перед намоткой ротора нажимные шайбы изолируются пропитанным электрокартоном толщиной 0,5—1 *мм*, который предварительно нарезают полосками, наклеиваемых на шайбы клеящим лаком и закрепляемые хлопчатобумажной лентой. Изоляция нажимных шайб должна плотно подходить к гильзе, чтобы при бандажировке лобовых частей ротора изоляция паза не нарушилась. В электродвигателях с незначительной толщиной нажимных шайб к торцам сердечника ротора прикрепляют изолировочные шайбы из электрокартона.

После изолировки пазов и нажимных шайб производится укладка стержней. Последовательность укладки может быть разной для роторов электродвигателей высокого и низкого напряжения, с изоляцией класса А, другого класса изоляции и т. д.

Способ выполнения обмотки ротора электродвигателя напряжением до 500 в при применении изоляции класса А.

Последовательность укладки стержней и последую-

щих технологических операций выполнения обмотки ротора.

Со стороны контактных колец в пазы укладываются (передняя сторона) перемычки по схеме.

Со стороны контактных колец укладываются нижние стержни, а на их лобовые части накладываются электрокартонная прокладка и временный бандаж из стальной проволоки или тафтяной ленты.

При помощи специальных ключей (рис. 70) со стороны привода загибаются нижние стержни в сторону и по форме согласно шаблону, а концы перемычек загибаются по форме лобовой части нижних стержней. Пра-



Рис. 70. Ключи для загибки стержней обмотки ротора.

вильное расположение стержням придают по окружности лобовой части. Между катушечными группами кладут изоляционные прокладки из электрокартона и лакоткани и бандажом из киперной ленты укрепляют лобовую часть. Затем поверх бандажа накладывают изоляционные прокладки из электрокартона и лакоткани и лобовую часть укрепляют киперной лентой.

Снимают временный бандаж с лобовой части со стороны контактных колец и накладывают бандаж из киперной ленты, изолируют и крепят лобовую часть так, как и со стороны привода.

В пазы кладут прокладки из электрокартона для изоляции нижних стержней от верхних.

Со стороны контактных колец укладываются верхние стержни и соединяют их с нижними стержнями через медные луженые скобочки (хомутики) в соответствии со схемой.

Производят загибку верхних стержней со стороны привода и соединяют их с нижними стержнями.

Прокладывают изоляционные прокладки между катушечными группами верхнего слоя обмотки.

Расклинивают стержни в хомутиках медными луже-

ными клиньями и производят пайку мягкими или твердыми припоями.

Соединяют концы фаз (временно) в звезду и проверяют правильность схемы и на отсутствие витковых замыканий.

Проверяют обмотку ротора на прочность изоляции между фазами и между фазами и корпусом.

Производят пайку кольцевой шины, соединяющей обмотку в звезду.

Подводят начала фаз к контактным кольцам и соединяют их пайкой.

Проверяют качество пайки, пропустив по обмотке ротора ток, превышающий рабочий ток ротора на 10—15%. В местах недоброкачественной пайки будет чрезмерный нагрев обмотки.

Накладывают на лобовые части бандаж согласно снятым данным при размотке ротора.

Производят балансировку ротора.

После проведенных операций ротор направляется для пропитки и сушки.

28. ПРОПИТКА И СУШКА ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Всякая изоляция обладает способностью впитывать в себя влагу, что снижает ее изоляционные свойства. Поэтому после частичного ремонта или перемотки статора (фазного ротора) необходимо обмотку высушить и пропитать изоляционными лаками, так как при сушке происходит удаление впитанной изоляцией влаги, а при пропитке — заполнение пустот и пор изоляции изоляционными пропиточными лаками.

Наиболее распространенным способом является сушка обмотки статора и ротора в печи горячим воздухом, подогреваемым паровыми или электрическими калориферами. Во время сушки должны быть обеспечены циркуляция горячего воздуха и удаление водяных паров и паров растворителей путем регулирования открытия заслонок в печи и вентиляционной системы.

Температура сушки обычно равна 110—115° С при продолжительности сушки 4—10 *ч*, а температура вынутого из печи статора (ротора) после сушки и перед пропиткой 60—80° С.

Продолжительность высыхания пропитанных обмоток зависит от начальной температуры и тепловой мощности сушильной печи, скорости циркуляции воздуха в печи, габаритов электродвигателей, степени загрузки печи и пр.

Приведенное ниже время сушки при пропитке обмоток некоторыми лаками ориентировочное и взято из практики ряда ремонтных заводов, поэтому оно должно корректироваться, исходя из местных условий.

До пропитки обмоток необходимо проверить вязкость лака вискозиметром Энглера, вискозиметром (воронки) НИИЛК или вискозиметром БЗ-4.

Наиболее распространенный вискозиметр БЗ-4 имеет объем воронки 100 *см*³, диаметр сопла 4 *мм* и высоту сопла 4 *мм*. Воронка заливается лаком с температурой 20° С до краев. Вязкость испытываемого лака определяется временем истечения его через сопло в секундах.

Вязкость по воронке НИИЛК также определяется временем истечения 100 *см*³ лака в мерный сосуд через сопло диаметром 7 *мм*.

Вязкость, замеренная по вискозиметру Энглера, выражается в градусах Энглера; числовая величина вязкости является частным от деления времени истечения 200 *см*³ лака или эмали через сопло вискозиметра на время истечения через то же сопло 200 *см*³ дистиллированной воды. Последняя величина дается как постоянная прибора и обычно равна 50—52 *сек*.

Ниже дается таблица перевода вязкости при измерении воронкой НИИЛК и вискозиметром Энглера для масляных лаков.

Рекомендуемые вязкости лаков по вискозиметру БЗ-4 при 20° С: № 458 и 447 — 20—36 *сек*, № 460 — 25—36 *сек*, БТ-99 — 30—60 *сек*, ГФ-95 — 30—50 *сек*.

Величина вязкости по воронке НИИЛК примерно равна $1/4$ величины вязкости, измеренной вискозиметром БЗ-4.

При вязкости, превышающей рекомендуемую для данной марки лака, в бак добавляется разбавитель, придерживаясь следующих требований.

Температура разбавителя должна быть примерно равна температуре лака.

Разбавитель следует вливать небольшими порциями

Таблица 12

Расчет вязкости по НИИЛК и Энглеру для масляных лаков

По НИИЛК при 20° С, *сек*	По Энглеру при 50° С, °Э	По НИИЛК при 20° С, *сек*	По Энглеру при 50° С, °Э
1	0,69	11	—
2	1,38	12	—
3	2,09	13	7,47
4	2,79	14	8,10
5	3,45	15	8,50
6	4,14	16	9,10
7	4,84	17	10,29
8	5,02	18	10,39
9	5,63	19	11,50
10	6,85		

и тщательно перемешивать с лаком деревянной палкой по всей глубине бака.

Если применяется смесь разбавителей, то необходимо разбавители предварительно смешать и только после этого состав смеси вливать малыми порциями в бак при постоянном перемешивании.

При переливании растворителей металлическую посуду необходимо заземлять во избежание искрения от электризации и вспышки паров растворителя.

После разбавления лака необходимо проверить качество лаковой пленки, образуемой лаком при опускании в него полоски тонкой гладкой бумаги. Пленка не должна иметь крупинок. При наличии крупинок в лаке необходимо повысить температуру в пропиточном помещении, чтобы лак соответственно нагрелся, и после этого снова тщательно перемешать лак и проверить качество его пленки. Свернувшийся лак в результате неправильной технологии приготовления или несоответствующего разбавителя для пропитки обмоток непригоден.

Пропитка статоров малых и средних машин производится методом погружения их в бак, наполненный изоляционным лаком соответствующей вязкости.

Пропитка статорных обмоток больших машин производится методом пульверизации или обливанием обмотки изоляционным лаком сперва с одной стороны, а после переворачивания статора — с другой. Для покрытия ла-

ком статор ставится на противень, куда при пульверизации или обливки стекает лак. Продолжительность пропитки статора, погруженного в бак, 10—20 *мин.* Пропитка считается законченной, когда прекратится выделение с поверхности лака пузырьков воздуха.

После пропитки статор ставится на стеллаж так, чтобы лишний лак с него свободно стекал. Время выдержки пропитанного статора на воздухе 30—60 *мин.* Перед загрузкой пропитанного статора в сушильную печь все поверхности, где не должно быть лаковой пленки, протираются смоченной в бензине тряпкой, особенно поверхности расточки статора и выводные концы.

Температура сушки статора, пропитанного обычными масляно-битумными изоляционными лаками (№ 458 и 447), 110—120° С; время сушки: лака № 458 — 6—8 *ч*, лака № 447 — 10—12 *ч*.

Для повышения качества изоляции применяется двойная пропитка, а повторная сушка производится при режимах, как для одноразовой пропитки.

В целях придания обмотке повышенной влагостойкости и гладкой блестящей поверхности статор дополнительно пропитывают в покровном лаке БТ-99 (б. 462-п) воздушной сушки с продолжительностью 6—8 *ч* при температуре 20° С. Покровный лак наносится на подогретые обмотки. При влагостойком исполнении обмоток применяется лак № 460 печной сушки.

Лаки № 458, 447, 460 и БТ-99 создают влаго- и теплостойкую пленку, но не маслостойки. Для придания пленке маслостойкости рекомендуется применять лак ГФ-95 (б. № 1154), печной сушки. Пропитка этим лаком производится, как обычным лаком, при температуре сушки 115—130° С продолжительностью 9—10 *ч*, а при температуре 130° С — 3—4 *ч*.

Для придания обмоткам маслостойкости и механической прочности после пропитки их покрывают эмалями (СВД, СПД и др.), которые наносятся на обмотку кистью, пульверизатором и — реже — окунанием.

Сушка обмоток электрических машин считается законченной, если сопротивление изоляции в течение 1—2 *ч* практически не изменяется, а ее величина не ниже рекомендованного минимального предела.

Сопротивление изоляции обмоток измеряется мегомметром напряжением 500 *в* для обмоток электродвига-

телей с номинальным напряжением ниже 500 *в* и мегомметром на 1 000 *в* при более высоком напряжении обмоток электродвигателей. Общепринято, что сопротивление изоляции обмоток при температуре 70—80° С должно быть не ниже 1 *Мом* на 1 *кв* рабочего напряжения для обмотки статора и 0,5 *Мом* для обмотки ротора, а при частичном ремонте ротора или после профилактической сушки — 0,2 *Мом*.

Примечание. Величина сопротивления изоляции не нормирована.

Внешним признаком достаточной сушки является отсутствие отлипа лаковой пленки.

Во время пропитки и при сушке обмоток электрических машин необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и противопожарной безопасности, изложенные в гл. 7.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНЫМ МЕРОПРИЯТИЯМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОБМОТОЧНО-ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАБОТ

Для безопасной работы в электроремонтных цехах и участках большое значение имеют регулярный инструктаж рабочих по технике безопасности и противопожарным мероприятиям и строгое соблюдение всеми работниками цехов и участков правил и требований техники безопасности и противопожарной безопасности.

По электробезопасности необходимо выполнять следующие требования:

а) Следить, чтобы на каждом рабочем месте была в исправном состоянии силовая, осветительная и технологическая электропроводка.

При появлении оголенных мест, неплотных контактов или обрывов проводов необходимо вызвать электромонтера или сообщить об этом мастеру.

Необходимо помнить, что напряжение системы 380/220 *в* является опасным для жизни и при нарушении правил техники безопасности может привести к поражению рабочего электрическим током со смертельным

исходом. Статистикой электротравматизма отмечаются также случаи смертельного поражения током при напряжении 65 *в.* Поэтому все технологические электропроводки к рабочим местам должны иметь безопасное напряжение.

По электробезопасности все производственные помещения подразделяются на три группы.

К первой группе относятся сухие помещения, отапливаемые, без токопроводящей пыли, с токонепроводящими полами и с небольшим количеством металлических конструкций, станков и машин. К этой группе в большинстве случаев относятся помещения электроремонтных цехов и участков. Безопасным напряжением считается напряжение 36 *в.* Ко второй группе относятся помещения сырые, с токопроводящими полами, с токопроводящей пылью, при значительной концентрации металлоконструкций, станков и машин, где безопасным напряжением является 12 *в.*

б) Испытания изоляции обмоток высоким напряжением должны производиться контролерами ОТК или специально выделенными и обученными работниками, знакомыми с безопасными методами работы при высоком напряжении.

Испытания электрической прочности изоляции должны производиться на специальном и огражденном стенде, имеющем сигнальные лампы, предупреждающие о включении высокого напряжения, с предостерегающими надписями: «Осторожно, высокое напряжение».

При работе с высоким напряжением необходимо пользоваться электрически проверенными резиновыми перчатками и резиновыми ковриками или ботами.

в) Систематически перед началом смеиы иеобходимо проверять наличие и надежность заземления электрооборудования, стаиков и металлоконструкций.

г) При пользовании электрическим паяльником напряжением 36 *в* необходимо руки беречь от ожогов. Пользование неисправными паяльниками не допускается.

При выполнении обмоточно-изоляционных работ, кроме требований по электробезопасности, необходимо выполнять следующие требования:

При резке изоляционных материалов на рычажных ножницах следует пользоваться прижимиой планкой

с нажатием на педаль, не придерживая материала рукой.

При резке изоляционных материалов ножом резку следует производить от себя.

Во время работы на намоточных станках в целях предохранения работающего от затягивания волос или одежды вращающимися частями станка рукава необходимо подвязывать, а на голову надевать косынку.

Перед изолировкой пазов и укладкой катушек необходимо проверить активную сталь статора (ротора). При наличии заусенцев, отогнутых зубцов, распушивания зубцов и пр. следует принять меры к их устранению.

В процессе электросварки проводов схемы следует пользоваться защитными очками.

При применении стекловолокнистой изоляции следует принять меры по защите рук от раздражающего действия кусочков стеклянного волокна. Стеклянные ленты и провода со стекловолокнистой изоляцией следует применять пропитанными.

Запрещается класть включенный или нагретый паяльник на деревянные верстаки или столы во избежание пожара.

Помещение, в котором производится пайка, должно иметь общую или местную вентиляцию.

При выполнении работ по пропитке и сушке обмоток, а также работ по покраске корпусов и других деталей электродвигателей, кроме общих, обязательных для всего персонала требований по электробезопасности, следует выполнять и следующие правила техники безопасности и противопожарной безопасности:

Перед началом работы (смены) пропиточно-сушильное отделение должно быть провентилировано.

Запрещается держать в открытой посуде лаки, эмали и разбавители. Хранить в помещении пропитки и сушки больше однодневного запаса горючих материалов не допускается.

Категорически запрещается курить, зажигать спички, выполнять работы, связанные с появлением искр в пропиточном и сушильном отделении, так как пары лаков и разбавителей и сами жидкости легко воспламеняются.

Работники пропиточного отделения должны выполнять все правила обращения с лаками и разбавителями и правила санитарной гигиены при обращении с едкими растворителями.

Мыть руки в бензине не рекомендуется, так как кожа становится от этого восприимчивой к различным кожным заболеваниям. Руки следует мыть с мылом в горячей воде.

Чтобы избежать чрезмерного распыления краски при покраске деталей пульверизатором, давление в сосуде пульверизатора должно быть не выше 0,5—1 *ат*, а в подводящих трубах или шлангах — не выше 2 *ат*.

Лица, непосредственно занятые окраской способом пульверизации, должны работать в респираторах и шлемах.

Окраску способом пульверизации необходимо производить в специальных шкафах, оборудованных вытяжной вентиляцией.

При поражении человека электрическим током необходимо принять срочные меры к освобождению пострадавшего от действия тока и в случае отсутствия признаков жизни сделать пострадавшему искусственное дыхание. Наряду с этим необходимо срочно вызвать врача.

Следует помнить, что от быстроты принятых мер зависит исход оказываемой пострадавшему помощи для возвращения его к жизни.

Таблица замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению

	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,56	1,62	1,68
0,44	0,90	—	—	—	1,08	1,12	—	—	—	—	—	—	1,50	1,56	1,62
0,47	—	0,93	—	—	—	—	1,16	—	—	—	—	—	—	—	—
0,49	—	—	0,96	—	—	—	—	1,20	—	—	—	—	—	—	—
0,51	0,86	0,90	—	1,00	1,04	1,08	—	—	1,25	1,30	—	—	—	—	—
0,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,40	—	—	—
0,55	0,83	—	0,93	—	—	—	1,12	—	—	—	—	—	—	—	—
0,57	—	—	—	0,96	—	—	—	1,16	—	—	—	—	1,45	—	—
0,59	0,80	0,86	0,90	—	1,00	1,04	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,62	—	0,83	—	0,93	—	—	1,08	—	1,20	1,25	—	—	—	1,50	1,56
0,64	0,77	—	0,86	—	0,96	—	—	1,12	—	—	1,30	1,35	—	—	—
0,67	—	0,80	—	0,90	—	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,69	0,72	0,77	0,83	—	0,93	—	1,04	—	1,16	—	—	—	1,40	—	—
0,72	0,69	0,74	0,80	0,86	—	0,96	—	1,08	—	1,20	—	—	—	1,45	—
0,74	—	0,72	—	0,83	0,90	—	1,00	—	1,12	—	1,25	1,30	—	—	—
0,77	0,64	0,69	—	0,80	0,86	—	—	1,04	—	1,16	—	—	1,35	—	1,50
0,80	0,59	0,67	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	—	1,08	—	1,20	—	—	1,40	—
0,83	0,55	0,62	0,69	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	—	1,12	—	1,25	—	—	—
0,86	0,51	0,59	0,64	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	1,04	—	1,16	—	1,30	—	1,45
0,90	0,44	0,51	0,59	0,67	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	—	1,20	—	1,35	—
0,93	—	0,47	0,55	0,62	0,69	—	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	—	1,25	—	1,40
0,96	—	—	0,49	0,57	0,64	0,72	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	—	1,30	—
1,00	—	—	—	0,51	0,59	0,67	0,74	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	—	1,35
1,04	—	—	—	—	0,51	0,59	0,69	0,77	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25	1,30
1,08	—	—	—	—	0,44	0,51	0,62	0,72	0,80	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	—
1,12	—	—	—	—	—	0,44	0,55	0,64	0,74	0,83	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25
1,16	—	—	—	—	—	—	0,47	0,57	0,69	0,77	0,86	0,96	1,04	1,12	1,20
1,20	—	—	—	—	—	—	—	0,49	0,62	0,72	0,80	0,90	1,00	1,08	1,16

	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,56	1,62	1,68
1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	0,51	0,62	0,74	0,83	0,93	1,04	1,12
1,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,51	0,64	0,74	0,86	0,96	1,04
1,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,53	0,64	0,77	0,90	1,00
1,40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,53	0,69	0,80	0,93
1,45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,57	0,72	0,86
1,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,44	0,62	0,77
1,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,44	0,62
1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,44
1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

	1,74	1,81	1,88	1,95	2,02	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,50	4,80	5,20
0,44	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,49	—	1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,51	—	—	1,81	1,88	1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,57	—	—	—	—	—	2,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,64	1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,67	—	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,72	—	—	1,74	1,81	1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,77	1,56	—	—	—	—	1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,80	—	1,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,83	—	—	1,68	—	—	—	2,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,86	1,50	—	—	1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,90	—	1,56	—	—	1,81	—	—	2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,93	—	—	—	—	—	1,88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,96	1,45	—	1,62	—	—	—	—	—	2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,00	—	1,50	—	1,68	1,74	—	2,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,04	1,40	—	1,56	—	—	—	—	—	—	2,63	—	—	—	—	—	—	—	—
1,08	1,35	1,45	—	1,62	—	1,81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,12	—	1,40	1,50	—	1,68	—	1,95	—	—	—	2,83	—	—	—	—	—	—	—
1,16	1,30	—	—	1,56	—	1,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,20	1,25	1,35	1,45	—	1,62	—	—	—	—	—	—	3,05	—	—	—	—	—	—
1,25	1,20	1,30	1,40	1,50	1,56	1,68	1,88	2,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

	1,74	1,81	1,88	1,95	2,02	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,50	4,80	5,20
1,30	1,16	1,25	1,35	1,45	—	—	—	—	—	—	—	—	3,28	—	—	—	—	—
1,35	1,08	1,20	1,30	1,40	1,50	1,62	1,81	2,02	2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,40	1,04	1,12	1,25	1,35	1,45	1,56	—	—	—	—	—	—	—	3,53	—	—	—	—
1,45	0,96	1,08	1,20	1,30	1,40	1,50	1,74	1,95	—	2,44	—	—	—	—	—	—	—	—
1,50	0,86	1,00	1,12	1,25	1,35	1,45	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,56	0,77	0,90	1,04	1,16	1,25	1,40	1,62	1,88	2,10	—	2,63	—	—	—	3,80	—	—	—
1,62	0,64	0,80	0,96	1,08	1,20	1,35	1,56	1,81	—	—	—	2,83	—	—	—	—	—	—
1,68	0,44	0,67	0,83	1,00	1,12	1,25	1,50	1,74	2,02	2,26	—	—	—	—	—	—	4,50	—
1,74	—	0,49	0,72	0,86	1,00	1,16	1,45	1,68	1,95	—	—	—	3,05	—	—	—	—	—
1,81	—	—	0,51	0,72	0,90	1,08	1,35	1,62	1,88	—	2,44	—	—	—	—	—	—	—
1,88	—	—	—	0,51	0,72	0,93	1,25	1,56	1,81	2,10	—	—	—	3,28	—	4,10	—	—
1,95	—	—	—	—	0,51	0,77	1,12	1,45	1,74	2,02	—	2,63	—	—	—	—	—	4,80
2,02	—	—	—	—	—	0,57	1,00	1,35	1,68	1,95	2,26	—	—	—	—	—	—	—
2,10	—	—	—	—	—	—	0,83	1,25	1,56	1,88	—	—	2,83	—	3,53	—	—	—
2,26	—	—	—	—	—	—	—	0,90	1,35	1,68	2,02	—	—	3,05	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	0,96	1,45	1,81	—	—	—	3,28	3,80	4,10	—
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,04	1,56	1,95	—	—	—	—	—	4,50
2,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,12	1,62	2,10	—	—	—	—	—
3,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,20	1,74	2,26	—	3,28	—	—
3,28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,30	1,88	2,44	3,05	3,53	—
3,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,40	2,10	—	3,28	3,80
3,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,56	2,44	—	3,53
4,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,88	2,44	—
4,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,68	2,63
4,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,95
5,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. При замене провода, диаметр которого указан в верхнем горизонтальном ряду, двумя другими один берется из вертикального столбца под данным диаметром, второй—по горизонтали влево от него в первом вертикальном столбце. Например, провод ⌀ 1,25 заменяется проводами ⌀ 1,16+⌀0,47 или ⌀ 1,12+⌀ 0,55, или ⌀ 1,08+⌀0,62 и т. д.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных трехфазных электродвигателей защищенного исполнении с короткозамкнутым ротором мощностью до 100 *квт* (по ГОСТ 186-56)

Мощность, *квт*	К. п. д. η, %				$\cos \varphi$			
	Скорость вращення (синхронная), *об/мин*							
	3 000	1 500	1 000	750	3 000	1 500	1 000	750
0,6	—	74,0	—	—	—	0,76	—	—
1,0	79,0	78,5	77,0	—	0,86	0,79	0,72	—
1,7	81,5	81,5	79,5	—	0,87	0,82	0,75	—
2,8	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0,78	—
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,0	—	0,91	0,89	0,88	—
100	91,5	92,0	—	—	0,92	0,89	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных трехфазных электродвигателей защищенного исполнения с фазным ротором мощностью до 100 *квт* (по ГОСТ 186-56)

Мощность, *квт*	К. п. д. η, %			$\cos \varphi$		
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*					
	1 500	1 000	750	1 500	1 000	750
1,7	—	72,5	—	—	0,72	—
2,8	78,0	75,5	—	0,82	0,74	—
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	—	0,88	0,84	—
100	90,5	—	—	0,88	—	—

Таблица выполнимости однослойных и двухслойных трехфазных обмоток при дробном числе пазов на полюс и фазу

(Синхрон) об/мин	z / $2p$	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
3 000	2	3	4	5	6	7	8	9	10	—	—
1 500	4	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	3	$3\frac{1}{2}$	4	$4\frac{1}{2}$	5	$5\frac{1}{2}$	6
1 000	6	1	—	—	2	—	—	3	—	—	4
750	8	—	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	3
600	10	—	—	1	$1\frac{1}{5}$	$1\frac{2}{5}$	$1\frac{3}{5}$	$1\frac{4}{5}$	2	$2\frac{1}{5}$	$2\frac{2}{5}$
500	12	—	—	—	1	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	2

Продолжение прилож. 4

Дополнительная таблица выполнимости двухслойных трехфазных обмоток

(Синхрон) об/мин	z / $2p$	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69
3 000	2	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$	—	—	—
1 500	4	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{3}{4}$	$5\frac{1}{4}$	$5\frac{3}{4}$
1 000	6	—	—	$1\frac{1}{2}$	—	—	$2\frac{1}{2}$	—	—	$3\frac{1}{2}$	—
750	8	—	—	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{5}{8}$	$1\frac{7}{8}$	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{3}{8}$	$2\frac{5}{8}$	$2\frac{7}{8}$
600	10	—	—	—	$1\frac{1}{10}$	$1\frac{3}{10}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{7}{10}$	$1\frac{9}{10}$	$2\frac{1}{10}$	$2\frac{3}{10}$
500	12	—	—	—	—	—	$1\frac{1}{4}$	—	—	$1\frac{3}{4}$	—

Количество катушечных групп в фазе и рекомендуемые шаги по пазам в двухслойных и однослойных секционных обмотках „вразвалку"

Число *об/мин*	Число пазов статора	Шаг по пазам	Число катушечных групп в фазах×число катушек в группе
а) Двухслойная обмотка			
3 000	12	1—6	2×2
3 000	18	1—8	2×3
3 000	24	1—9	2×4
3 000	30	1—11	2×5
3 000	36	1—13	2×6
3 000	48	1—18	2×8
1 500	18	1—5	2×1+2×2
1 500	24	1—6	4×2
1 500	27	1—7	3×2+1×3
1 500	36	1—8	4×3
1 500	42	1—9	2×3+2×4
1 500	48	1—11	4×4
1 500	54	1—13	2×4+2×5
1 500	60	1—14	4×5
1 000	27	1—5	3×1+3×2
1 000	36	1—6	6×2
1 000	45	1—7	3×2+3×3
1 000	54	1—8	6×3
1 000	72	1—11	6×4
750	36	1—5	4×1+4×2
750	48	1—6	8×2
750	54	1—7	6×2+2×3
750	60	1—7	4×2+4×3
750	72	1—8	8×3
б) Однослойная секционная обмотка „вразвалку"			
3 000	12	1—6	2×1
3 000	18	1—8	1×1+1×2
3 000	24	1—11	2×2
3 000	30	—	—
3 000	36	1—16	2×3
3 000	48	1—21	2×4
1 500	18	—	—
1 500	24	1—6	4×1
1 500	27	—	—
1 500	36	1—8; 1—9	2×1+2×2
1 500	42	—	—
1 500	48	1—11	4×2
1 500	54	—	—
1 500	60	—	—

Число *об/мин*	Число пазов статора	Шаг по пазам	Число катушечных групп в фазах×число катушек в группе
1 000	27	—	—
1 000	36	1—6	6×1
1 000	45	—	—
1 000	54	1—8; 1—9	3×1+3×2
1 000	72	1—11	6×2
750	36	—	—
750	48	1—6	8×1
750	54	—	—
750	60	—	—
750	72	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Чередование катушечных групп при дробных числах пазов на полюс и фазу $q = \left(в + \frac{c}{d}\right)$

Число пазов на полюс и фазу q	Чередование катушечных групп
$1\frac{1}{2}$	(1—2), (1—2) и т. д.
$1\frac{1}{4}$	(1—1—1—2), (1—1—1—2) и т. д.
$1\frac{3}{4}$	(1—2—2—2), (1—2—2—2) и т. д.
$1\frac{1}{5}$	(1—1—1—1—2), (1—1—1—1—2) и т д.
$1\frac{2}{5}$	(2—1—2—1—1), (2—1—2—1—1) и т. д.
$1\frac{3}{5}$	(1—2—1—2—2), (1—2—1—2—2) и т. д.
$1\frac{4}{5}$	(1—2—2—2—2), (1—2—2—2—2) и т. д.
$1\frac{1}{7}$	(1—1—1—1—1—1—2), (1—1—1—1—1—1—2) и т. д.
$1\frac{2}{7}$	(1—2—1—1—1—2—1), (1—2—1—1—1—2—1) и т. д.

Число пазов на полюс и фазу q	Чередование катушечных групп
$1\frac{3}{7}$	(1—2—1—2—1—2—1), (1—2—1—2—1—2—1) и т. д.
$1\frac{4}{7}$	(2—1—2—1—2—1—2), (2—1—2—1—2—1—2) и т. д.
$1\frac{5}{7}$	(2—1—2—2—2—1—2), (2—1—2—2—2—1—2) и т. д.
$1\frac{6}{7}$	(1—2—1—1—1—2—1), (1—2—1—1—1—2—1) и т. д.
$2\frac{1}{2}$	(2—3), (2—3) и т. д.
$2\frac{1}{4}$	(2—2—2—3), (2—2—2—3) и т. д.
$3\frac{1}{4}$	(3—3—3—4), (3—3—3—4) и т. д.
$4\frac{1}{5}$	(4—4—4—4—5), (4—4—4—4—5) и т. д

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимин В. И., Каплан М. Я. и др. Обмотки электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.

2. Виноградов Н. В., Обмотчик электрических машин, Трудрезервиздат, 1958.

3. Дренов П. В., Справочник по ремонту электрических машин, Гостехиздат УССР, 1958.

4. Андриевский С. К. и Шапиро М. Н., Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры, Гостехиздат УССР, 1959.

5. Коварский Е. М., Ремонт электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.

6. Мещеряков В. В. и Ченцов И. М., Пересчет электрических машин и таблицы обмоточных данных, Госэнергоиздат, 1950.

7. Жерве Г. К., Расчет асинхронного двигателя при перемотке, Госэнергоиздат, 1959.

8. Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1956.

9. Ривлин Л. Б., Электродвигатели и их эксплуатация, Госэнергоиздат, 1950.

10. Девятков А. Ф., Волоцкий Н. П., Пискунов С. А. и Шац Е. Л., Ремонт электрических машин и трансформаторов, Сельхозгиз, 1960.

11. Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б. и Несговорова Е. Д., Испытание электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.

12. Справочник по электротехническим материалам. Под общей редакцией Андрианова К. А., Богородицкого Н. П., Корицкого Ю. В. и Тареева Б. М., т. 1, ч. 1-я, Госэнергоиздат, 1958; т. 1, ч. 2-я, Госэнергоиздат, 1959.